



Recherches récentes sur la chimie des eaux dans le haut bassin versant cristallin du Tarn

Claude Martin, Jean-François Didon-Lescot

► To cite this version:

Claude Martin, Jean-François Didon-Lescot. Recherches récentes sur la chimie des eaux dans le haut bassin versant cristallin du Tarn. *Etudes de Géographie Physique*, 2005, XXXII, pp.3-26. hal-00325277

HAL Id: hal-00325277

<https://hal.science/hal-00325277>

Submitted on 27 Sep 2008

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

RECHERCHES RÉCENTES SUR LA CHIMIE DES EAUX DANS LE HAUT BASSIN VERSANT CRISTALLIN DU TARN

Claude MARTIN et Jean-François DIDON-LESCOT ⁽¹⁾

(1) : UMR 6012 "ESPACE" du CNRS, Département de Géographie, Université de Nice-Sophia-Antipolis, 98 Boulevard Édouard Herriot, BP 3 209, 06 204 NICE cedex 03. Mél : martincl@infonie.fr .

RÉSUMÉ : Les connaissances sur les fonctionnements hydrochimiques acquises de 1981 à 1997 sur le Bassin Versant de Recherche et Expérimental (BVRE) du Mont-Lozère, ont été complétées de 1999 à 2002. Les mesures ont porté non seulement sur deux des petits bassins versants granitiques initialement suivis (Latte : 0,195 km² ; Cloutasses : 0,81 km²), mais aussi sur des bassins de plus grande taille équipés plus récemment (jusqu'à 14,5 km² – aux substrats constitués de granite et/ou de micaschistes). Plusieurs campagnes de prélèvements d'eau ont en outre été menées sur de nombreux points du BVRE, voire même du haut bassin versant du Tarn.

L'étude des eaux de pluie met en évidence la stabilité dans le temps des entrées de sulfate (peut-être en légère diminution) et l'augmentation de celles de nitrate. L'importance des apports de poussières sahariennes, qui ont fait l'objet d'observations spécifiques, est discutée.

Les bilans hydrochimiques annuels n'apportent pas d'informations véritablement nouvelles. Ceux du bassin versant de la Latte (0,195 km²), qui a subi une coupe à blanc des épicéas de 1987 à 1989, confirment le retour des fonctionnements hydrochimiques à la situation antérieure à la coupe, laquelle avait été suivie par une augmentation considérable des exportations de nitrate et, par voie de conséquence, de cations basiques. Ceux du bassin de l'Alignon en amont des Urfruits (5,1 km²) témoignent de fonctionnements semblables à ceux des bassins plus petits.

Une attention particulière est portée au risque éventuel d'acidification des eaux. La comparaison des pH observés sur la période 1999-2002, avec les valeurs mesurées en 1982 et 1986 ne confirme pas l'hypothèse d'une acidification en cours.

MOTS-CLÉS : bassins versants cristallins, composition chimique des eaux, bilans hydrochimiques, évolution du pH, Mont-Lozère.

ABSTRACT : The hydrochemical behaviours of small catchments monitored from 1981 to 1997 at the Mont-Lozère Experimental Research Basin (ERB), was surveyed again from 1999 to 2002. The measurements were carried out on two of the small initially monitored catchments (Latte : 0,195 km² ; Cloutasses : 0,81 km²), and also on bigger instrumented more recently (up to 14,5 km² –substrates of granite and/or micaschists). Several sampling campaigns at many points of the research basin, and of the upper basin of the Tarn river, were carried out.

The study of rainwater shows the stability over time of the sulphate inputs (perhaps a light decrease) and the increase of those of nitrate. The importance of Saharan dust contribution is discussed.

The annual hydrochemical budgets confirm the previous observations on the global functioning of these catchments. In the Latte catchment, which was affected by a clearfelling of the spruces from 1987 to 1989, and consequently experienced a considerable increase of soluble outputs of nitrate and basic cations, the 1999-2002 budget confirm the return to the former situation. The hydrochemical behaviour of the Alignon catchment (upstream of Urfruits) is similar to those of the smaller basins.

A special attention is paid to the risk of acidification of surface water. The comparison of the pH observed over the period 1999-2002, with the values measured in 1982 and 1986 does not confirm that acidification is in progress.

KEY-WORDS : crystalline catchments, water chemical composition, hydrochemical budgets, pH evolution, Mont-Lozère.

I - INTRODUCTION

De 1999 à 2002, de nouvelles observations ont été réalisées sur la chimie eaux du haut bassin

versant du Tarn dans le cadre d'une étude intégrée commandée par le Parc national des Cévennes. Nous en présentons ici les premières interprétations. Ces investigations complètent les connaissances précédemment acquises depuis la

création du Bassin Versant de Recherche et Expérimental (BVRE) du Mont-Lozère en 1981.

Outre l'objectif de préciser l'évolution de la composition chimique des eaux au cours de la période récente, les investigations avaient pour finalité d'apporter des informations susceptibles d'éclairer les interprétations réalisées par les autres équipes impliquées dans le programme, sur les algues (Cemagref-Bordeaux : M. COSTE *et al.*, 2004), les macroinvertébrés aquatiques (Cemagref-Aix-en-Provence : B. DUMONT et G. ARCHAMBAUD, 2003) et les poissons (Conseil Supérieur de la Pêche - 48 : D. BEAU-DOU et M. FOISSY, 2003).

Les recherches s'appuient en grande partie sur le dispositif d'observation hydrologique du BVRE, lequel couvre une superficie de 25,2 km² sur les bassins versants de l'Alignon et de la Goudesche. Les substrats sont constitués de granite et de micaschistes. Bien que le terrain d'étude se trouve dans un secteur où l'encaissement des vallées reste relativement modéré, le relief présente un caractère assez accusé, avec des altitudes comprises entre 1005 et 1493 m. Les couverts végétaux sont formés d'une mosaïque associant hêtraie, pessière, pelouse et lande. L'espace considéré est quasiment exempt d'habitations, à l'exception de quelques hameaux, le tout n'excédant pas 15 habitants permanents.

II - MESURES : MATÉRIEL ET MÉTHODES

1) Collecte des eaux de pluie

Les précipitations ont été recueillies en deux points du bassin versant de l'Alignon, à la station climatologique de La Vialasse (altitude : 1290 m) et dans une clairière du Valat de Jouc (altitude : 1090 m), les deux sites étant distants d'environ 2,6 km (Fig. 1).

Le même système de collecte a été adopté pour les deux sites. Il comportait un entonnoir en polyéthylène, d'un diamètre de 305 cm², à ouverture horizontale, relié à un bidon récepteur de 10 litres protégé de la lumière. Une grille en plastique retenait les débris les plus grossiers.

La chronique considérée pour les précipitations va du 20 juin 1999 au 2 septembre 2002 pour La Vialasse (avec un découpage en 59 périodes) et du 9 février 2000 au 2 septembre 2002 pour Jouc (33 périodes). Les prélèvements

ont été réalisés après chaque épisode de précipitation pour La Vialasse, alors que pour Jouc certains prélèvements ont été mélangés de telle sorte que chaque échantillon reconstitué représente environ un mois de collecte. On a porté un soin particulier à réduire au maximum le temps de séjour de l'eau dans les collecteurs, en particulier en été.

Les lacunes d'échantillonnage ont été très faibles à La Vialasse : 230 mm (38,4 mm entre le 15 juin et le 17 juillet 2000 – eaux polluées par la décomposition d'insectes – ; 90,0 mm du 6 au 15 mars 2001 – échantillon perdu après la détermination de la conductivité et du pH – ; 102,1 mm du 1^{er} au 20 juin 2001 – développement d'algues avant l'envoi au laboratoire d'analyses –). Sur la même période, les précipitations se sont élevées à 6294 mm.

Les lacunes sont plus fortes à Jouc : 633,5 mm sur un total pluviométrique de 5637 mm, mais elles sont toutes concentrées en 2000, année où trois échantillons ont été éliminés (périodes du 16 au 24 mars : 64,3 mm ; du 6 au 18 avril : 222,9 mm ; du 26 octobre au 16 novembre : 346,3 mm).

Des prélèvements spécifiques pour la mesure des retombées de poussières "sahariennes" ont été réalisés à la station de La Vialasse du 11 mars 1998 au 4 août 2001. Le collecteur était constitué d'un entonnoir (surface réceptrice de 113 cm²) placé sur un bidon de 10 litres à 45 cm au-dessus du sol. Le bidon était changé après chaque épisode pluvieux. Pour déterminer la masse de la fraction particulaire de chaque prélèvement, il a été procédé à la filtration – sur une membrane Nuclepore® 0,4 µm préalablement pesée – de toute l'eau recueillie et de l'eau minéralisée de rinçage, au séchage à l'étuve puis à la pesée de la membrane et du refus de filtration. Les pesées et les observations à la loupe binoculaire ont été effectuées à l'Unité de Biogéochimie Marine de l'École Normale Supérieure de Paris.

2) Prélèvement des eaux des ruisseaux

Les principaux points de prélèvement correspondent aux stations hydrométriques implantées sur le BVRE du Mont-Lozère (Fig. 1 ; Tab. I). Les bassins des Cloutasses et de la Latte appartiennent au dispositif mis en place en 1981, alors que les autres bassins ont été équipés à la fin des années 1990.

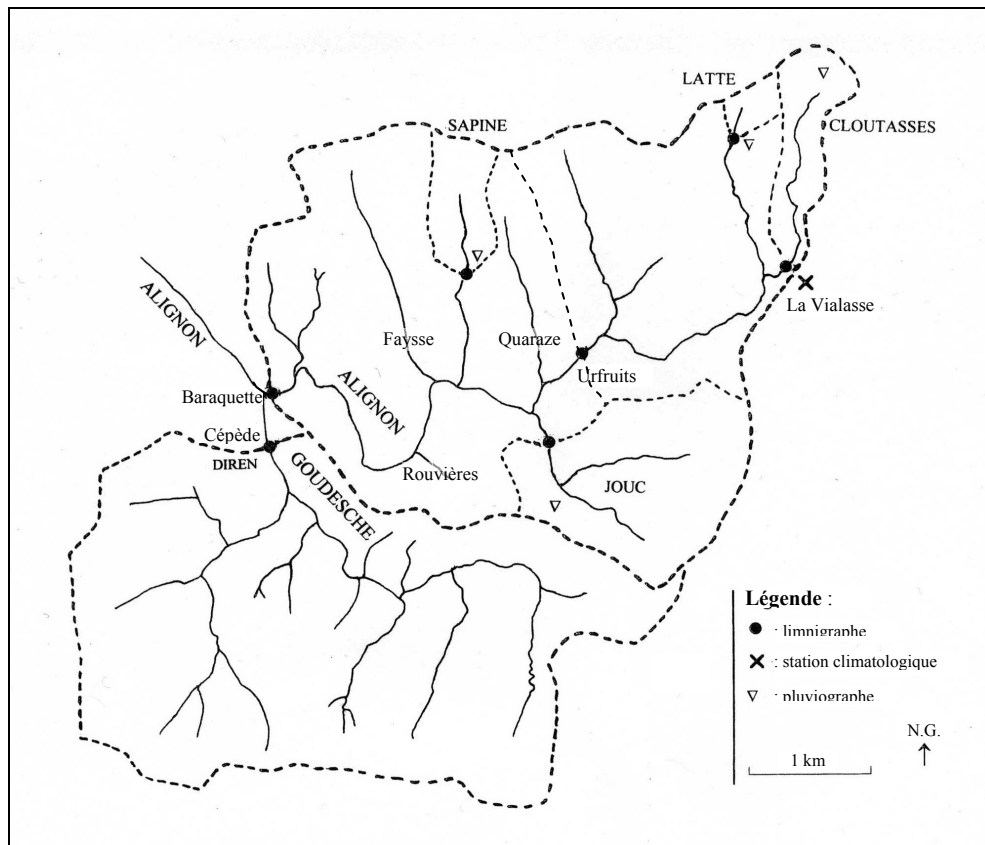


Figure 1 - Le dispositif de mesure du BVRE du Mont-Lozère (Alignon - Goudesche) en 2002.

Tableau I - Caractères des bassins versants et dates de début des suivis hydrochimiques.

	Goudesche (Cépède)	Alignon (Baraquette)	Jouc	Urfruits	Cloutasses	Latte
Superficie (km ²)	10,7	14,5	1,7	5,1	0,81	0,195
Lithologie (%)						
Granite	10	75	0	100	100	100
Micaschistes	85	25	100	0	0	0
Arkoses	5	0	0	0	0	0
Couvert forestier (%)	> 90 ⁽¹⁾	52 ⁽¹⁾	98	≈ 50	10 ⁽²⁾	87 ⁽²⁾ *
Type de végétation dominant	Épicéas, hêtres	Couvert composite	Épicéas, hêtres	Couvert composite	Lande et pelouse	Épicéas
Début des prélèvements	Juillet 1999	Juin 1999	Sept. 1999	Mars 2000	Sept. 1999	Juin 2000

(1) : F. DUBLANCHET, 1999. (2) : P. DURAND, 1989. * : avant la coupe à blanc des épicéas.

Les eaux ont été prélevées manuellement dans des flacons en polyéthylène. Le rythme des prélèvements a été de un à deux par mois sur chaque site au cours des années 1999-00 et 2000-01. En 2001-02, cinq échantillons seulement ont été prélevés sur la plupart des cours d'eau. Mais le rythme des prélèvements est resté plus élevé pour le ruisseau de la Latte et pour l'Alignon à la station des Urfruits.

En juin 1999, afin de permettre des comparaisons avec les données antérieures, quelques échantillons ont été prélevés en dehors des points de suivi habituels. Dans la même perspective, en mai 2001, 25 échantillons prélevés en autant de points des bassins de l'Alignon et de la Goudesche ont fait l'objet de mesures du pH, de la conductivité et de la concentration du nitrate. Une campagne du même type a été réalisée en juin 2002, mais elle a porté

sur l'ensemble du bassin versant du haut Tarn (près de 200 km²). Trente trois échantillons ont été récoltés (dont cinq aux points de prélèvement habituels). Vingt d'entre eux ont subi une analyse complète.

3) Les mesures

La conductivité, le pH et la concentration du bicarbonate ont été déterminés, par l'UMR ESPACE, sur des eaux non filtrées. Les autres analyses ont été menées après filtration sur membrane 0,45 µm. Les dosages du bicarbonate par l'UMR ESPACE ont débuté sur des échantillons prélevés en octobre 2001, les premiers essais effectués par un autre laboratoire n'ayant pas donné satisfaction. Le bicarbonate a été dosé par volumétrie (à l'acide sulfurique avec recherche du point équivalent sur la courbe de titration établie grâce à un suivi au pH-mètre). Quelques vérifications sur des échantillons confiés à d'autres laboratoires ont été effectuées, par volumétrie (calcium, magnésium, chlorure) ou par colorimétrie (silice, ammonium, nitrate).

De juin 1999 à décembre 2000, les analyses ont été effectuées par le Centre de Géomorphologie de Caen. Le calcium et le magnésium ont été dosés par absorption atomique, le sodium et le potassium par photométrie de flamme, et les autres éléments par colorimétrie. Pour les analyses colorimétriques, ce laboratoire utilisait un auto-analyseur Technicon. À notre demande, les dosages turbidimétriques du sulfate ont été effectués après ajout systématique d'étalon interne (sous forme d'acide sulfurique).

De janvier à août 2001, les échantillons ont été confiés à l'Unité de Biogéochimie Marine de l'ENS de Paris. Les cations basiques ont été dosés par absorption atomique ; l'ammonium, le chlorure, le nitrate et le sulfate par chromatographie ionique ; la silice par colorimétrie.

À partir de septembre 2001, il a été fait appel au Service Central d'Analyse du CNRS. Les métaux ont alors été dosés par ICP-AES (ARL 3580) ; l'ammonium a été déterminé par chromatographie ionique (Waters), de même que les anions (Dionex).

Au total, 363 échantillons ont été traités par le Centre de Géomorphologie de Caen, l'Unité de Biogéochimie Marine de l'ENS de Paris ou le Service Central d'Analyse du CNRS.

4) Problèmes pour la détermination du pH

La mesure du pH à l'aide d'un pH-mètre n'est jamais présentée comme une opération extrêmement délicate. Pourtant les difficultés peuvent être importantes. Il convient de s'y arrêter dans une étude qui s'intéresse notamment aux risques éventuels d'acidification du milieu.

Pour les mesures *in situ*, l'étalonnage d'un pH-mètre sur le terrain n'est pas toujours commode, en particulier lorsque les conditions climatiques sont difficiles. Par ailleurs, les électrodes gélifiées présentent parfois des temps de réponse assez longs dans les eaux naturelles. Nous avons donc opté pour des mesures au laboratoire.

Au laboratoire, les mesures sont théoriquement très simples, mais les résultats peuvent considérablement varier selon le matériel et le protocole utilisés.

Le pH des eaux du BVRE du Mont-Lozère est déterminé depuis 1986. Les mesures ont été effectuées à l'aide d'un pH-mètre Tacussel analogique U9N et d'une électrode combinée Bioblock. L'échantillon était versé dans un petit bécher en verre de 50 ml et subissait une agitation continue par un agitateur magnétique pendant toute la durée de la mesure. Cette façon de procéder qui a été employée jusqu'en 1999 a pour effet une légère sous-estimation systématique du pH. On notera du reste que pour une étude élargie à l'ensemble du Mont-Lozère (B. GUILLET *et al.*, 1997), le Laboratoire de Géologie de la Matière Organique d'Orléans, qui était alors en charge de la gestion du BVRE, a déterminé les pH sans agiter les prises d'échantillon au moment de la mesure.

Sauf nécessité de procéder à des comparaisons avec des résultats obtenus de façon différente, les mesures récentes du pH ont été effectuées sans agitation continue de la prise d'échantillon. Les mesures ont été réalisées :

- d'une part, variante 1 du protocole, à l'aide d'un pH-mètre analogique Radiometer PhMeter29 et d'une électrode combinée Radiometer GK2401C : la prise d'échantillon est placée soit dans bécher en verre de 100 ml qu'elle remplit à un peu moins de la moitié (dans le cadre du dosage du bicarbonate), soit dans un petit récipient cylindrique en plastique d'une contenance inférieure à 50 ml qu'elle remplit aux deux tiers. L'agitation se fait manuellement,

en imprimant un mouvement de rotation au récipient. Lors des premières déterminations, l'agitation était assez violente et l'opération était renouvelée jusqu'à stabilisation de la valeur du pH. Cette manière d'opérer favorisant le dégazage de la prise d'échantillon, et donc la mise en équilibre du pH avec les conditions du laboratoire, nous avons adopté un protocole moins agressif : une série de quinze légères rotations, suivie d'une nouvelle série de cinq rotations (à chaque fois, la stabilisation est presque immédiate). Les valeurs des mesures en petit godet avec faible agitation sont légèrement plus basses que celles en béccher avec faible agitation (écart inférieur à 0,1 unité pH). L'écart s'accroît légèrement lorsque l'agitation du béccher est plus poussée.

- d'autre part, variante 2 du protocole, à l'aide d'un pH-mètre Schott à affichage numérique et d'une électrode combinée Bioblock : la prise d'échantillon est placée dans un petit récipient en plastique tronconique vers le bas et subit une agitation d'une seconde avec un agitateur magnétique avant la mesure qui se fait après une assez longue période de stabilisation (4 minutes) ;

La comparaison entre les résultats obtenus selon les deux variantes du protocole fait apparaître des différences assez fortes. Certes, une première série comparative traitée en mars 2001 avait donné des valeurs équivalentes, mais les pH mesurés suivant la variante 2 se sont ensuite révélés sensiblement plus faibles que ceux mesurés suivant la variante 1, parfois de plus de 0,3 unité pH. La divergence entre les résultats est attribuée à la lenteur de la réponse pour les mesures effectuées avec la variante 2. Après bien des essais, il semblerait que l'électrode soit en cause, en raison sans doute de son inadaptation à des eaux très peu ionisées. La mise en œuvre d'une électrode de terrain Bioblock pHast pour la mise en œuvre de ce protocole, a du reste conduit à en améliorer les résultats.

En conclusion, l'abandon de l'agitation en continu a conduit à obtenir des valeurs de pH plus élevées, qui donnent une image plus satisfaisante de la réalité. Selon les nuances apportées au protocole général, les valeurs obtenues diffèrent encore légèrement. Mais, pour un même échantillon, les écarts les plus sensibles semblent provenir des matériels utilisés. La variante 1 du protocole a été retenue comme référence. Les relations entre les résultats ont permis d'homogénéiser les données de pH sur la base des

mesures en petit godet avec faible agitation.

III - COMPOSITION CHIMIQUE DES PLUIES

1) Caractérisation des eaux

Les données acquises sont synthétisées dans les tableaux II et III. Les concentrations moyennes ont été calculées en pondérant les concentrations mesurées par les volumes d'eau recueillis.

Les eaux sont le plus souvent légèrement acides et faiblement minéralisées. Pour aucun des éléments analysés, les résultats obtenus ne mettent en évidence de problème particulier.

Sur la période allant du 9 février 2000 au 2 septembre 2002, les compositions chimiques moyennes diffèrent assez peu à La Vialasse et à Jouc. La différence la plus sensible concerne le nitrate (1,7 mg/l à La Vialasse contre 1,1 mg/l à Jouc). À cet égard, on peut se demander si l'environnement de la station de La Vialasse ne joue pas un rôle : proximité d'un hameau et présence fréquente de troupeaux. L'exposition des sites est sans doute également à prendre en compte.

Les concentrations moyennes annuelles étant exprimées en méq/l, on note que le calcium est le cation le plus abondant, alors que le sulfate est dominant parmi les anions (Fig. 2). Les concentrations maximales du calcium ont été obtenues lors d'épisodes marqués par des apports de poussières sahariennes (pour les eaux recueillies à La Vialasse : 2,5 mg/l du 6 avril au 2 mai 2000 ; 2,75 mg/l du 2 au 30 mai 2000 ; 7,4 mg/l du 15 au 21 mars 2001 ; 3,2 mg/l du 20 juin au 11 juillet 2001 ; 2,5 mg/l du 15 mars au 19 avril 2002 ; 2,95 mg/l du 13 juin au 13 juillet 2002).

L'étude des régressions entre les différents paramètres mesurés dans les eaux a été menée pour 56 échantillons d'eau de pluie prélevés à La Vialasse du 21 juin 1999 au 2 septembre 2002. En considérant les concentrations en méq/l, elle fournit les indications suivantes :

- La conductivité électrique est fortement liée à la sommes des cations Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{+} , Na^{+} et NH_4^{+} (coefficient de corrélation linéaire, $r = +0,85$) et à la somme des anions Cl^{-} , NO_3^{-} et

Tableau II - Composition chimique (concentrations en mg/l) des eaux de pluie recueillies par le collecteur de La Vialasse du 9 février 2000 au 2 septembre 2002.

P		Cond.	pH	SiO ₂	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	NH ₄ ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	PO ₄ ³⁻
5 096 mm N = 52	Min.	6,2	4,47	0,00	0,10	0,02	tr	0,04	0,00	0,0	0,15	0,00	0,92	tr
	Max.	42,3	7,37	0,37	7,4	0,44	2,2	2,3	2,5	17,1	3,7	11,2	6,6	1,1
	Moy.	15,7	5,13	0,03	0,97	0,13	0,21	0,55	0,38	1,2	0,96	1,7	2,5	—
	n	51	51	27	49	49	49	49	49	31	49	49	49	10

P. : précipitations (mm). Cond. : conductivité à 25 °C (μS/cm/cm²). pH : pH à 25 °C (les données correspondent à des mesures effectuées suivant la variante 1 du protocole adopté, en petit récipient avec faible agitation). N : nombre d'épisodes déterminés par les passages sur le terrain. Min. : valeurs minimales. Max. : valeurs maximales. Moy. : valeurs moyennes pondérées par les précipitations (pour le pH, il s'agit du pH moyen calculé à partir de la concentration moyenne pondérée des ions H⁺ ; pour la conductivité, la valeur moyenne est déterminée en passant par les logarithmes des valeurs mesurées). n : nombre d'échantillons analysés. — : données manquantes. On notera que les concentrations maximales du potassium, du nitrate et du phosphate ont été mesurées dans trois échantillons différents, ce qui ne va pas dans le sens d'une pollution par des déjections d'oiseau.

Tableau III - Composition chimique (concentrations en mg/l) des eaux de pluie recueillies par le collecteur de Jouc du 9 février 2000 au 2 septembre 2002.

P		Cond.	pH	SiO ₂	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	NH ₄ ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	PO ₄ ³⁻
5 637 mm N = 33	Min.	9,1	4,71	0,00	0,22	0,02	0,005	0,08	0,02	0,0	0,30	0,25	1,0	0,02
	Max.	48,8	6,82	0,09	3,4	0,55	0,91	1,9	3,9	9,0	3,5	5,7	6,3	0,23
	Moy.	16,0	5,09	0,02	0,86	0,11	0,18	0,44	0,37	0,40	0,94	1,1	2,3	0,07
	n	26	29	19	30	30	30	30	30	16	30	30	30	5

Voir la légende du tableau II.

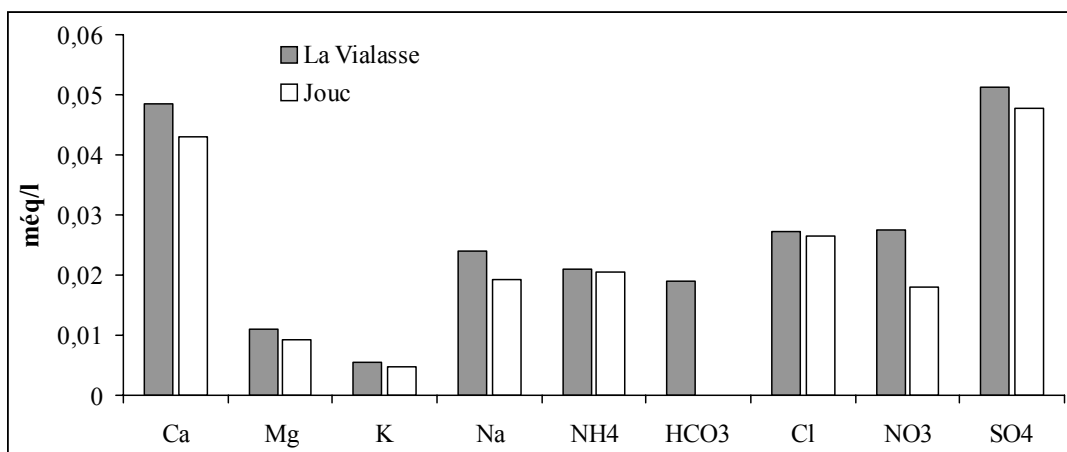


Figure 2 - Composition chimique moyenne des eaux de pluie recueillies aux stations de La Vialasse et de Jouc du 9 février 2000 au 2 septembre 2002 (le bicarbonate n'a pas représenté pour Jouc, le nombre des échantillons analysés étant jugé insuffisant).

SO₄²⁻ (r = +0,85).

- En ce qui concerne les régressions entre la conductivité et les cations, le coefficient de corrélation le plus élevé est trouvé pour le magnésium (r = +0,80), devant le calcium (r = +0,64), le potassium (r = +0,61), l'ammonium (r = +0,49) et le sodium (r = +0,45).

- La conductivité est fortement liée à la somme NO₃⁻ + SO₄²⁻ (r = +0,81). Les coefficients de régression s'établissent à +0,72 pour le sulfate, +0,73 pour le nitrate et +0,54 seulement pour le chlorure.
- Les relations sont étroites entre Na⁺ et Cl⁻ (r = +0,91 – valeur qui peut paraître relativement

faible pour ce couple d'éléments, mais les eaux sont extrêmement diluées et trois laboratoires ont été impliqués), Mg^{2+} et Ca^{2+} ($r = +0,62$; $+0,75$ en écartant un échantillon), Mg^{2+} et SO_4^{2-} ($r = +0,60$), ce qui est classique dans les précipitations où se mélangent des éléments d'origines marine et continentale. Le calcium et le sulfate sont également unis par une relation significative au niveau 5 % ($r = +0,39$ à la station de La Vialasse ; $+0,48$ en écartant un échantillon).

- La liaison entre NH_4^+ et NO_3^- est également assez forte ($r = +0,44$).
- En revanche, la relation est pratiquement nulle entre H^+ et la somme $NO_3^- + SO_4^{2-}$ ($r = -0,04$). La relation avec H^+ est un peu meilleure pour le sulfate ($r = -0,15$) que pour le nitrate ($r =$

$-0,07$), mais à des niveaux non significatifs.

2) Les apports d'éléments minéraux de 1999-00 à 2001-02

Les flux entrants ont été évalués à partir des hauteurs d'eau précipitées annuelles et des compositions chimiques annuelles moyennes des eaux recueillies. Les résultats sont portés dans le tableau IV. La grosse lacune portant à Jouc sur la période allant du 26 octobre au 16 novembre 2000 (P : 346,3 mm) a été comblée avec les concentrations déterminées dans les eaux recueillies à La Vialasse. De même, les données du poste de Jouc ont servi à pallier certaines lacunes au poste de La Vialasse.

Tableau IV - Apports annuels d'éléments minéraux atmosphériques dans les collecteurs d'eau de pluie de La Vialasse et de Jouc de juillet 1999 à juin 2002 (Kéq/l pour H^+ ; t/km² pour les autres éléments).

1999-00	P	H^+	SiO ₂	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+	Na^+	NH_4^+	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}
La Vialasse	1971	12,21	0,002	2,51	0,32	0,48	1,29	1,03	2,64	4,27	5,86
2000-01	P	H^+	SiO ₂	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+	Na^+	NH_4^+	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}
La Vialasse	2634	4,58	0,00	1,60	0,24	0,35	1,15	0,70	2,00	2,82	5,24
Jouc	2981	26,78	0,00	2,08	0,31	0,16	1,66	0,26	3,01	2,93	6,15
2001-02	P	H^+	SiO ₂	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+	Na^+	NH_4^+	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}
La Vialasse	1529	10,40	0,11	1,49	0,22	0,34	0,92	0,55	1,48	3,02	3,70
Jouc	1584	14,90	0,08	1,14	0,10	0,19	0,63	0,30	1,16	2,20	3,23

P : précipitations annuelles (mm).

Les écarts entre les apports aux postes de La Vialasse et de Jouc diffèrent sensiblement d'une année à l'autre. Les seuls éléments pour lesquels les valeurs se placent dans le même ordre en 2000-01 et 2001-02 sont le potassium et l'ammonium, dont les entrées ont été plus fortes à La Vialasse. En 2000-01, l'abondance des précipitations ne s'est pas accompagnée d'apports particulièrement abondants, les eaux de pluie

ayant été plus diluées.

3) Comparaison avec les données antérieures

Le tableau V présente les données obtenues à la station de La Vialasse sur la période 1982-1995.

Tableau V - Composition chimique moyenne des eaux de pluie et apports annuels moyens d'éléments minéraux atmosphériques à la station de La Vialasse sur la période 1982-1995 (précipitations annuelles moyennes : 1868 mm ; valeurs extrêmes : 1075 et 2540 mm).

	H^+ *	SiO ₂	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+	Na^+	NH_4^+	HCO_3^-	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}
Conc.	20,9	0,06	0,73	0,12	0,18	0,69	0,39	0,46	1,2	1,4	2,9
Apports	37,4	0,11	1,37	0,23	0,34	1,29	0,73	0,86	2,18	2,52	5,41

Conc. : concentration moyenne pondérée par les pluies (* μ éq/l pour H^+ , mg/l pour les autres éléments). Apports : apports d'éléments minéraux annuels moyens (Kéq/l pour H^+ , t/km²/an pour les autres éléments). * : sur 11 années complètes avec le même protocole de mesure du pH (juillet 1984 - juin 1995).

Par rapport aux valeurs moyennes sur la période 1982-1995, les années 1999-00 à 2001-02 se caractérisent par de fortes entrées de calcium (1,49 à 2,51 t/km²/an à La Vialasse, contre 1,37 t/km²/an sur la période 1982-1995), cela en relation avec la fréquence des épisodes à poussières sahariennes. Le nitrate a également été fourni en abondance (2,82 à 4,27 t/km²/an, contre 2,52 t/km²/an). Pour les autres éléments, les apports ont été globalement assez proches des valeurs moyennes sur la période 1982-1995. On observe, en particulier, que le sulfate n'a pas montré de diminution nette par rapport aux suivis antérieurs, même si les entrées ont atteint 4,93 t/km²/an en moyenne de juillet 1999 à juin 2002, contre 5,41 t/km²/an sur la période 1982-1995. La différence entre les deux périodes s'explique en effet par la très faible pluviosité de l'année 2001-2002. Certes, les entrées de sulfate et de calcium ont été globalement mesurées en nette diminution en France de 1993 à 2002, pour les 26 stations de mesure du réseau CATAENAT : -39,7 % en moyenne pour les concentrations du sulfate ; -29,8 % pour celles du calcium (E. ULRICH, 2003). Mais cette évolution est loin d'être générale. De 1993 à 1998, l'abaissement des concentrations du sulfate, interprété comme la conséquence de la réduction des émissions de soufre liées aux activités industrielles, concernait 36 % des stations (au nombre de 27) et celle des dépôts de cet élément n'était sensible que sur 19 % d'entre elles (E. ULRICH *et al.*, 2002).

En ce qui concerne H⁺, les concentrations moyennes et les apports annuels trouvés sur la période 1999-2002 (4,4 µeq/l ; 9,1 Kéq/km²) ont été sensiblement plus faibles que sur la période antérieure (20,7 µeq/l ; 39,4 Kéq/km²). Cela tient évidemment à l'amélioration des mesures du pH, du moins en très grande partie.

4) Les apports de poussières

Les pesées et les examens à la loupe binoculaire ont été réalisés à l'Unité de Biogéochimie Marine de l'École Normale Supérieure de Paris. Les observations à la loupe binoculaire des refus de filtration, permettent de distinguer :

- les poussières d'origine locale (débris végétaux et grains minéraux plus ou moins grossiers) ;
- les poussières d'origine lointaine, qui se décomposent en poussières d'origine anthropique (pollution), de couleur noire, et en poussières sahariennes, de couleur brun-rouge.

La chronique comprend 71 échantillons. Les 24 premiers échantillons (prélevés du 11 mars au 1^{er} octobre 1998) ont été exploités dans la thèse de H. CELLE (2000). La deuxième série (47 échantillons) a été collectée du 13 septembre 1999 au 4 août 2001. Les données sont présentées dans le tableau VI.

Tableau VI - Les apports de poussières à la station de La Vialasse.

	Du 11/03 au 01/10 1998	Du 19/09/99 au 04/08/01
Précipitations (mm)	998	4 504
Poussières totales (mg/m ²)	1 095	11 327
- Poussières locales (mg/m ²)	585	2 387
- Apports lointains (mg/m ²)	510	8 754
(pollution)	—	(1 185)
(poussières sahariennes)	—	(7 569)

Les apports de poussières ont été faibles de mars à octobre 1998. En revanche, ils ont été relativement forts de septembre 1999 à août 2001.

Sur les 47 échantillons analysés de septembre 1999 à août 2001, 14 seulement renfermaient des poussières de type saharien, contre 33 des poussières de type pollution et 28 des poussières de type local. Les poussières d'origine saharienne n'en représentent pas moins

la part la plus importante de l'ensemble des poussières (67 % des poussières, pour 30 % seulement des échantillons).

Aucune analyse, chimique ou minéralogique, n'a été effectuée sur les poussières récoltées sur le Mont-Lozère. M.D. LOÏE-PILOT *et al.* (1986) indiquent, à propos de la Corse, que les poussières sahariennes présentent des teneurs en calcite allant de 5 à plus de 30 % et qu'elles renferment également du gypse, mais avec des

teneurs généralement inférieures à 2 %. A. AVILA *et al.* (1997) observent, sur le site de Montseny en Catalogne, que ces poussières contiennent, outre du quartz, du feldspath et des minéraux argileux, de la calcite (teneur médiane de 7,5 % pour 13 événements – extrêmes : 0,5 et 21 %) et de la dolomie (teneur médiane de 5 % – extrêmes : 0,5 et 9 %).

La présence de poussières sahariennes se traduit dans la composition chimique des eaux de pluie, notamment par un pH élevé et de fortes concentrations du calcium et du sulfate. Si le gypse est complètement dissous dans les eaux de pluie, la calcite et la dolomie vont continuer de le faire après leur dépôt. Sur la période allant du 19 septembre 1999 au 4 août 2001, les retombées de poussières sahariennes à la station de la Latte représentent des apports de l'ordre de 0,11 t/km²/an pour le calcium et de 0,05 t/km²/an

pour le magnésium. En revanche, du 11 mars au 1^{er} octobre 1998, les entrées de ces éléments liés aux apports de poussières ont été très faibles. Du fait de cette variabilité, il est impossible de se faire une idée des apports annuels moyens à partir des quelques données disponibles.

IV - LES EAUX DES RUISSEAUX

Le tableau VII résume les résultats des analyses d'eau pour les stations des Cloutasses, de la Baraquette (Alignon) et de la Cépède (Goudesche) où les prélèvements ont été également répartis tout au long de la période d'étude. Les eaux apparaissent légèrement acides et très faiblement minéralisées.

Tableau VII - Composition chimique des eaux du ruisseau des Cloutasses, de l'Alignon à la Baraquette et de la Goudesche à la Cépède sur la période 1999-2002 : moyennes arithmétiques des valeurs mesurées (en gras), médianes (en italique), maxima et minima (entre parenthèses).

	Cloutasses (bassin de 0,81 km ²)	Alignon à la Baraquette (bassin de 14,5 km ²)	Goudesche à la Cépède (bassin de 10,7 km ²)
pH	6,33 - 6,35 (5,67 - 6,62 ; n = 56)	6,49 - 6,50 (5,87 - 6,90 ; n = 78)	6,58 - 6,57 (6,24 - 6,89 ; n = 58)
Conductivité à 25 °C (µS/cm/cm ²)	15,8 - 15,7 (12,3 - 23,9 ; n = 56)	20,8 - 20,2 (17,3 - 28,6 ; n = 79)	27,2 - 23,7 (19,5 - 37,4 ; n = 60)
SiO ₂ (mg/l)	2,72 - 2,78 (1,58 - 4,2 ; n = 39)	3,41 - 3,55 (0,71 - 4,9 ; n = 45)	3,95 - 3,96 (1,2 - 5,0 ; n = 41)
Ca ²⁺ (mg/l)	1,15 - 1,15 (0,80 - 1,5 ; n = 44)	1,46 - 1,40 (1,0 - 2,2 ; n = 50)	1,66 - 1,62 (1,1 - 2,5 ; n = 46)
Mg ²⁺ (mg/l)	0,31 - 0,30 (0,20 - 0,47 ; n = 44)	0,47 - 0,45 (0,35 - 0,71 ; n = 50)	0,82 - 0,82 (0,45 - 1,2 ; n = 46)
K ⁺ (mg/l)	0,28 - 0,24 (0,15 - 0,60 ; n = 44)	0,44 - 0,39 (0,29 - 1,1 ; n = 50)	0,43 - 0,43 (0,30 - 0,72 ; n = 45)
Na ⁺ (mg/l)	1,05 - 1,02 (0,79 - 1,6 ; n = 44)	1,30 - 1,26 (1,0 - 1,8 ; n = 50)	1,73 - 1,73 (1,1 - 2,7 ; n = 46)
NH ₄ ⁺ (mg/l)	0,038 - 0,025 (0,00 - 0,12 ; n = 39)	0,032 - 0,025 (0,00 - 0,11 ; n = 46)	0,039 - 0,021 (0,00 - 0,17 ; n = 42)
HCO ₃ ⁻ (mg/l)	2,76 - 2,79 (1,0 - 4,0 ; n = 20)	4,14 - 3,90 (1,7 - 6,8 ; n = 19)	5,49 - 5,13 (2,4 - 9,2 ; n = 18)
Cl ⁻ (mg/l)	1,12 - 1,10 (0,81 - 1,85 ; n = 44)	1,47 - 1,45 (1,15 - 2,3 ; n = 50)	2,22 - 2,11 (1,1 - 5,3 ; n = 46)
NO ₃ ⁻ (mg/l)	0,42 - 0,35 (0,00 - 1,1 ; n = 44)	0,93 - 0,86 (0,15 - 2,0 ; n = 50)	0,68 - 0,66 (0,30 - 2,0 ; n = 46)
SO ₄ ²⁻ (mg/l)	2,78 - 2,47 (1,9 - 7,6 * ; n = 43)	2,78 - 2,70 (1,7 - 4,1 ; n = 51)	3,52 - 3,51 (2,7 - 4,6 ; n = 46)
Σ ⁺ (méq/l)	0,136 - 0,135 (0,096 - 0,176 ; n = 44)	0,179 - 0,171 (0,132 - 0,264 ; n = 50)	0,237 - 0,229 (0,163 - 0,336 ; n = 45)

Entre parenthèses : valeurs extrêmes et nombre d'échantillons analysés (n). Σ⁺ : somme des cations basiques (Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺ et Na⁺). * : nous avons exclu une valeur de 17,2 mg/l, la balance ionique de cet échantillon étant fortement déséquilibrée au profit des anions.

1) pH

Les moyennes arithmétiques des pH correspondant aux mesures effectuées suivant la variante 1 du protocole adopté (en petit récipient avec faible agitation) s'établissent comme suit : 6,33 pour le ruisseau des Cloutasses ; 6,34 pour celui de Jouc (5,97 à 6,58 – n : 44) ; 6,49 pour l'Alignon à la Baraquette et 6,58 pour la

Goudesche. Les données dont nous disposons ne mettent pas en évidence de variation systématique des pH en fonction des saisons. La figure 3 fait plutôt ressortir une augmentation assez régulière des pH sur la période 1999-2002, mais l'interprétation de cette figure est délicate, les valeurs acquises jusqu'à la mi-octobre 2000 ayant été reconstituées lors de l'homogénéisation des données.

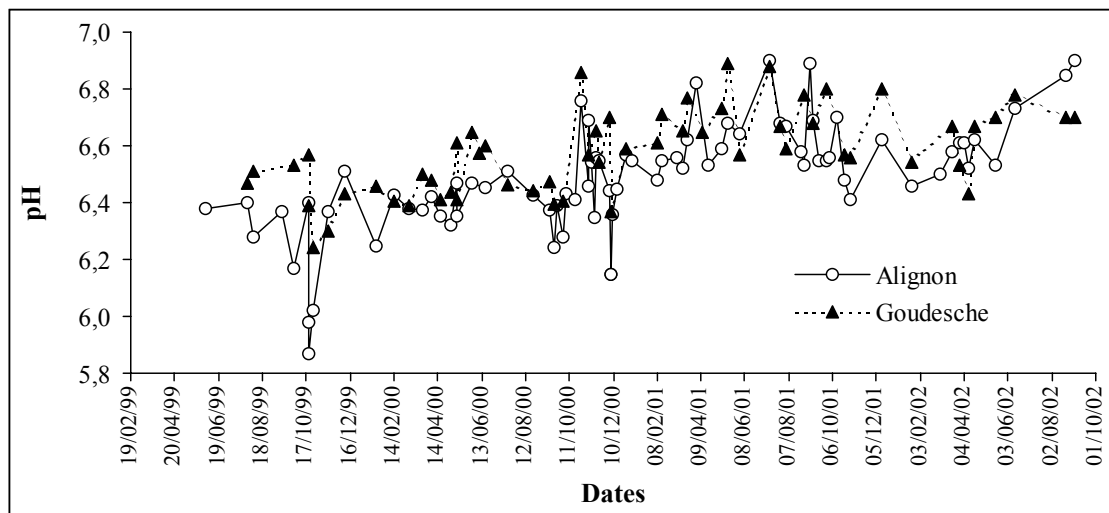


Figure 3 - Mesures du pH des eaux de l'Alignon au pont de la Baraquette et de la Goudesche à la Cépède.

Les pH sont corrélés négativement aux débits. Certes, la relation est souvent très médiocre (Tab. VIII), mais il n'en demeure pas moins vrai que sur la période 1999-2002, les débits ayant fait l'objet d'une mesure du pH sont loin des plus forts débits mesurés : 602 l/s (pH =

5,94) sur le ruisseau des Cloutasses, contre un débit maximal de 1509 l/s ; 11 761 l/s (pH = 5,87) sur l'Alignon au pont de la Baraquette, contre 27 426 l/s ; 8 517 l/s (pH = 6,39) sur la Goudesche, contre 25 200 l/s...

Tableau VIII - Coefficients de corrélation linéaire (r) entre le débit instantané et les différents paramètres mesurés dans les eaux du ruisseau des Cloutasses, de l'Alignon au pont de la Baraquette et de la Goudesche à la Cépède sur la période 1999-2002.

	pH	Cond.	SiO ₂	Σ ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	NH ₄ ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
Cloutasses	-0,28	-0,47	-0,44	-0,66	-0,58	-0,55	-0,20	-0,49	-0,02	-0,65	-0,03	-0,28	+0,02
Alignon	-0,56	-0,46	-0,38	-0,50	-0,46	-0,48	+0,02	-0,55	-0,02	-0,66	-0,05	+0,12	+0,13
Goudesche	-0,31	-0,35	-0,34	-0,24	-0,16	-0,18	+0,07	-0,37	-0,17	-0,66	-0,14	-0,00	-0,16

Cond. : conductivité. Nombre d'échantillons : voir tableau VII.

Les données recueillies à la station de la Baraquette montrent qu'à l'échelle annuelle, la relation entre la concentration en ions H⁺ et le débit (r = +0,63 – Fig. 4) est plus étroite que celles entre le débit et le pH (r = -0,58) ou entre

le logarithme du débit et le pH (+0,44). Pour un épisode hydrologique donné, les mesures effectuées en décrue permettent d'établir des équations évidemment plus pertinentes que les équations annuelles.

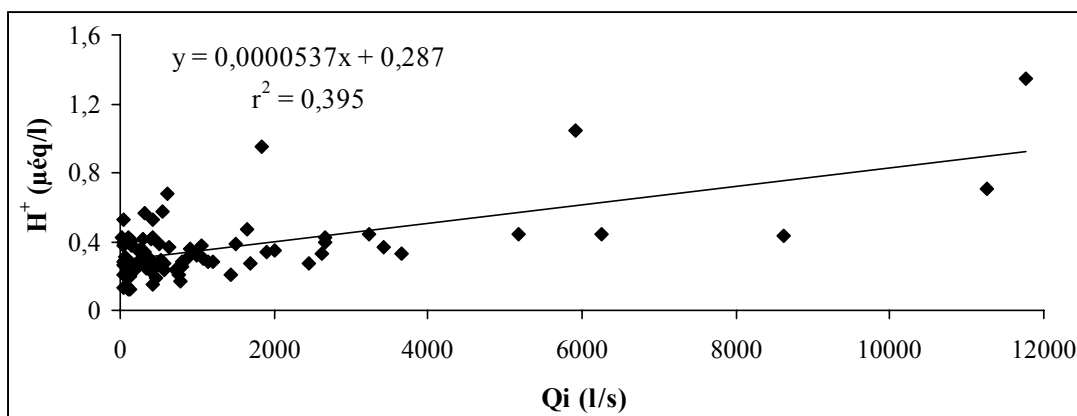


Figure 4 - Régression entre la concentration en ions H^+ et le débit pour les eaux de l'Alignon au pont de la Baraquette sur la période 1999-2002.

En appliquant l'équation de la droite de régression trouvée pour l'Alignon au pont de la Baraquette, entre les concentrations en ions H^+ et les débits pour les prélèvements des 21 et 26 octobre 1999 (débits de 11761 l/s et de 1831 l/s respectivement, en décrue), on évalue à 5,75 le pH en pointe de crue le 21 octobre (27400 l/s). En utilisant les autres relations, les valeurs en pointe de crue s'établissent à 5,71 en utilisant la relation entre le pH et le débit et à 5,86 en utilisant celle entre le pH et le logarithme du débit.

Sur la Goudesche, pour le même épisode, le pH a diminué au cours de la décrue : 6,39 le 21 pour un débit de 8517 l/s ; 6,24 le 26 pour un débit de 780 l/s. Le ruisseau des Cloutasses n'a pas été échantillonné les 21 et 26 octobre 1999.

L'ensemble des résultats ne témoigne pas d'une très forte acidité du milieu. On notera en outre que les pH les plus bas ne correspondent pas toujours à des écoulements très violents. Cela est particulièrement vrai dans l'exemple des Cloutasses, la valeur la plus faible ayant été observée, le 11 octobre 2001 pour un débit de 9,4 l/s (pH de 5,67 pour un flacon d'échantillon et de 5,97 pour un autre). Mais les échantillons prélevés ce jour là dans les autres cours d'eau n'ont pas manifesté une telle acidité. Pour un petit bassin versant comme celui des Cloutasses, les eaux fournies par les versants à proximité du point de prélèvement peuvent avoir une forte influence, en particulier en période pluvieuse (précipitations de 114,1 mm du 28 septembre au 9 octobre 2001, dont 8,7 mm le 9 octobre). Cela explique du reste la faiblesse du coefficient de régression linéaire entre le débit et le pH pour le ruisseau des Cloutasses.

On notera que les eaux de source ont des pH beaucoup plus faibles que les ruisseaux. En effet, elles sont chargées en gaz carbonique, et leur dégazage s'effectue assez rapidement dans les cours d'eau. Ainsi, le 11 septembre 2001, la source de la Latte (dont les eaux assuraient l'intégralité du débit du ruisseau) présentait un pH de 5,82 ; alors que quelques dizaine de mètres en aval, au niveau de la station limnigraphique, le pH atteignait déjà 6,63.

2) Minéralisation

Pour les prélèvements effectués de septembre 1999 à septembre 2002 (Tab. VII), la moyenne arithmétique des conductivités à 25 °C s'élève à 15,8 $\mu S/cm/cm^2$ pour le ruisseau des Cloutasses ; 17,6 $\mu S/cm/cm^2$ pour celui de Jouc (15,9 à 21,1 – n : 45) ; 20,8 $\mu S/cm/cm^2$ pour l'Alignon à la Baraquette et 27,2 $\mu S/cm/cm^2$ pour la Goudesche.

Les eaux de l'Alignon à la Baraquette présentent une minéralisation supérieure à celle des eaux du ruisseau des Cloutasses. L'accroissement est assez sensible pour le nitrate, sans doute en relation avec la localisation du hameau de Masméjean dans la partie moyenne du bassin. Les eaux de la Goudesche se révèlent plus riches en éléments dissous que celles de l'Alignon. La lithologie intervient évidemment à cet égard. Mais il semble qu'il faille moins incriminer les proportions relatives de granite (75 % dans le bassin de l'Alignon, contre 10 % dans celui de la Goudesche) et de micaschistes (25 % dans le bassin de l'Alignon, contre 85 % dans celui de la Goudesche), que la présence – même si elle est très discrète – de roches sédimentaires du Trias susceptibles de contenir des évaporites, dans le bassin de la Goudesche. En effet, plusieurs

campagnes de mesures portant sur de nombreux cours d'eau, ont montré que beaucoup de ruisseaux sur micaschistes, dont celui de Jouc, écoulent des eaux très peu minéralisées.

En considérant les concentrations moyennes exprimées en méq/l, le calcium est le cation

dominant, devant le sodium, le magnésium et le potassium (Fig. 5). Le magnésium est relativement bien représenté dans les eaux de la Goudesche. Parmi les anions, le plus abondant est soit le sulfate (Cloutasses) soit le bicarbonate (Baraquette et Goudesche). Ces deux éléments précèdent le chlorure et le nitrate.

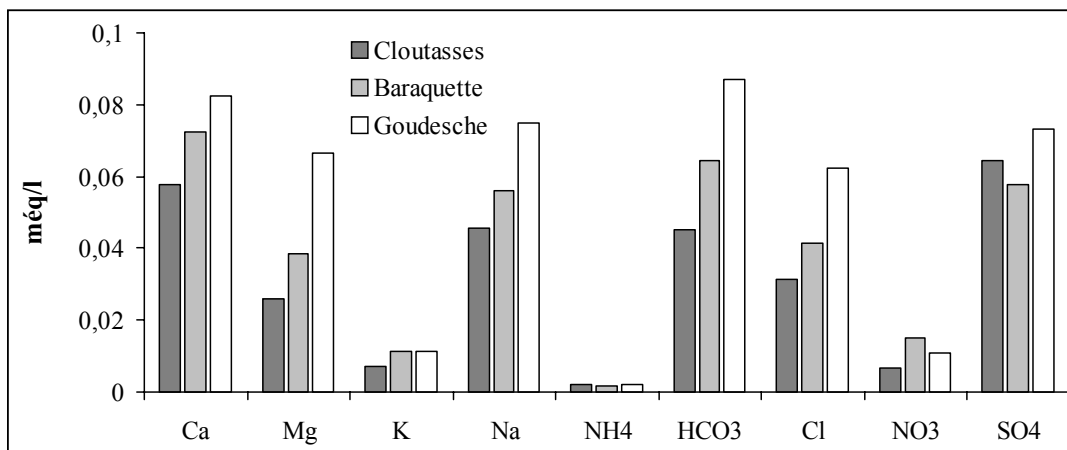


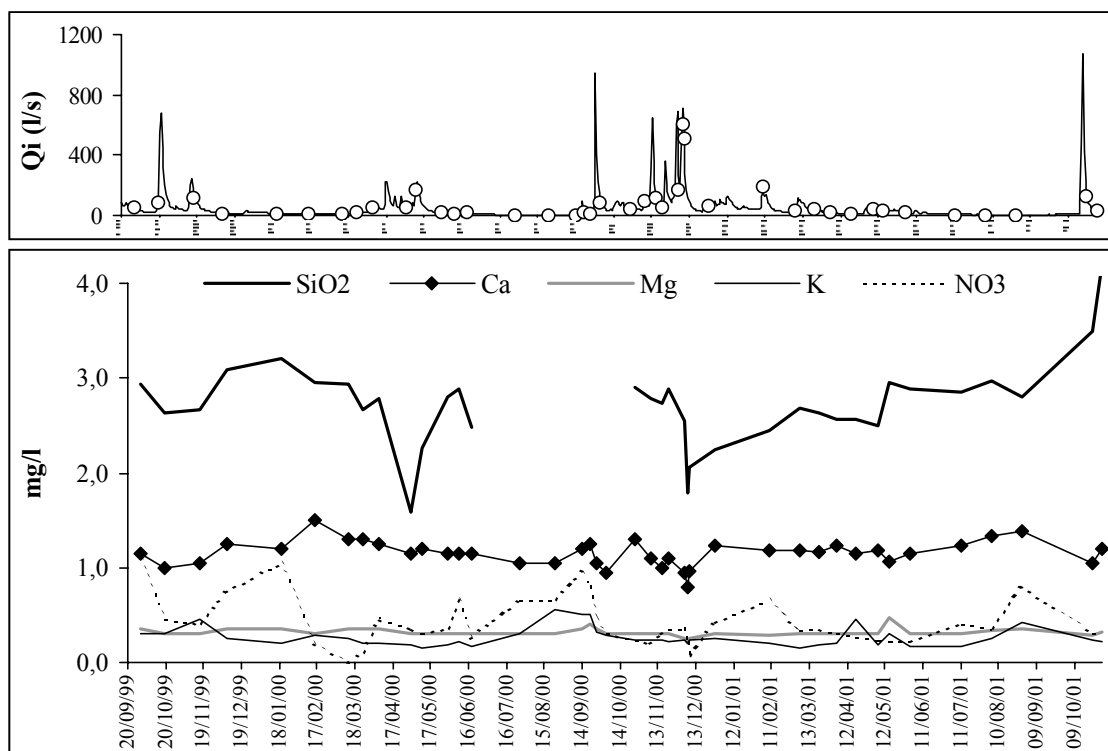
Figure 5 - Moyennes arithmétiques des concentrations (méq/l) mesurées dans les eaux des ruisseaux des Cloutasses, de l'Alignon à la Baraquette et de la Goudesche à la Cépède sur la période 1999-2002.

Pour chaque cours d'eau, la minéralisation globale des eaux et les différentes concentrations manifestent des variations importantes, en particulier pour le nitrate et la silice (Fig. 6 à 8). Pour l'Alignon, la station des Urfruits a été choisie de préférence à celle de la Baraquette, car elle a fait l'objet de nombreux prélèvements en 2002. Parmi les exemples présentés, les variations les plus sensibles sont observées sur la Goudesche. Les données disponibles ne permettent pas de dégager de tendances saisonnières, sauf pour la silice dont les teneurs apparaissent maximales en fin d'été.

Les régressions linéaires entre la composition chimique des eaux et le débit se révèlent assez lâches (Tab. VIII). Les coefficients de corrélation (r) sont généralement négatifs, ce qui pourrait témoigner d'une diminution des concentrations en hautes eaux. Il faut cependant admettre que les données disponibles restent peu démonstratives à cet égard (Fig. 9 à 11). Les eaux étant toujours peu minéralisées, la composition chimique des eaux de pluie, la concentration des eaux souterraines par l'évapotranspiration, la libération d'éléments minéraux par l'altération des roches et les cycles biogéochimiques combinent

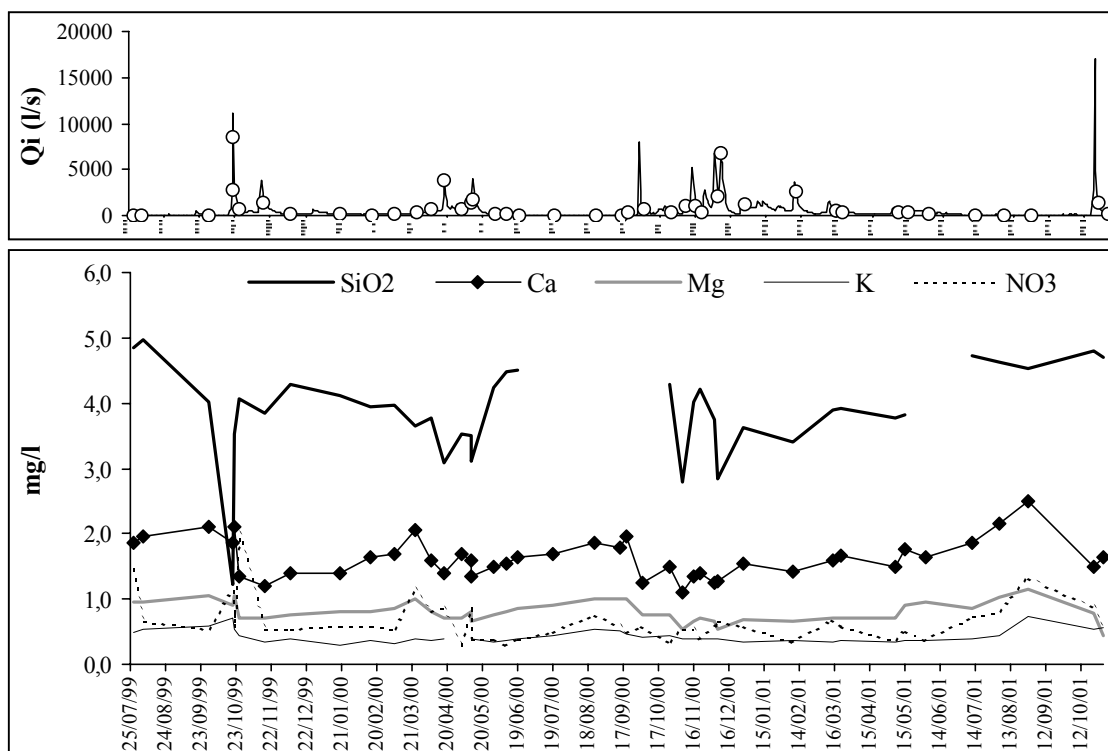
leurs effets pour rendre complexes les fluctuations dans le temps des concentrations de tous les éléments.

Que le débit soit assez mal corrélé avec la concentration de la plupart des éléments sur une période de trois ans n'est pas surprenant, les conditions étant très changeantes d'un épisode hydrologique à l'autre (C. MARTIN, 1987). Mais la conductivité des eaux n'est pas non plus reliée de façon très étroite aux concentrations de tous les éléments. En ce qui concerne l'Alignon à la Baraquette (Tab. IX), les régressions les plus serrées impliquant ce paramètre sont établies avec le magnésium ($r = +0,82$), le bicarbonate ($r = +0,79$) et la somme des cations basiques ($r = +0,77$). Les relations ne sont pas meilleures entre les éléments minéraux. Certes, le bicarbonate est fortement lié au calcium ($r = +0,83$) et au magnésium ($+0,89$). Mais la relation entre le chlorure et le sodium s'est fortement dégradée par rapport aux précipitations ($r = +0,39$ seulement). Dans les eaux de l'Alignon au pont de la Baraquette, le calcium est assez bien lié au magnésium ($r = +0,81$ – Fig. 12) et au sodium ($r = +0,77$ – Fig. 13).



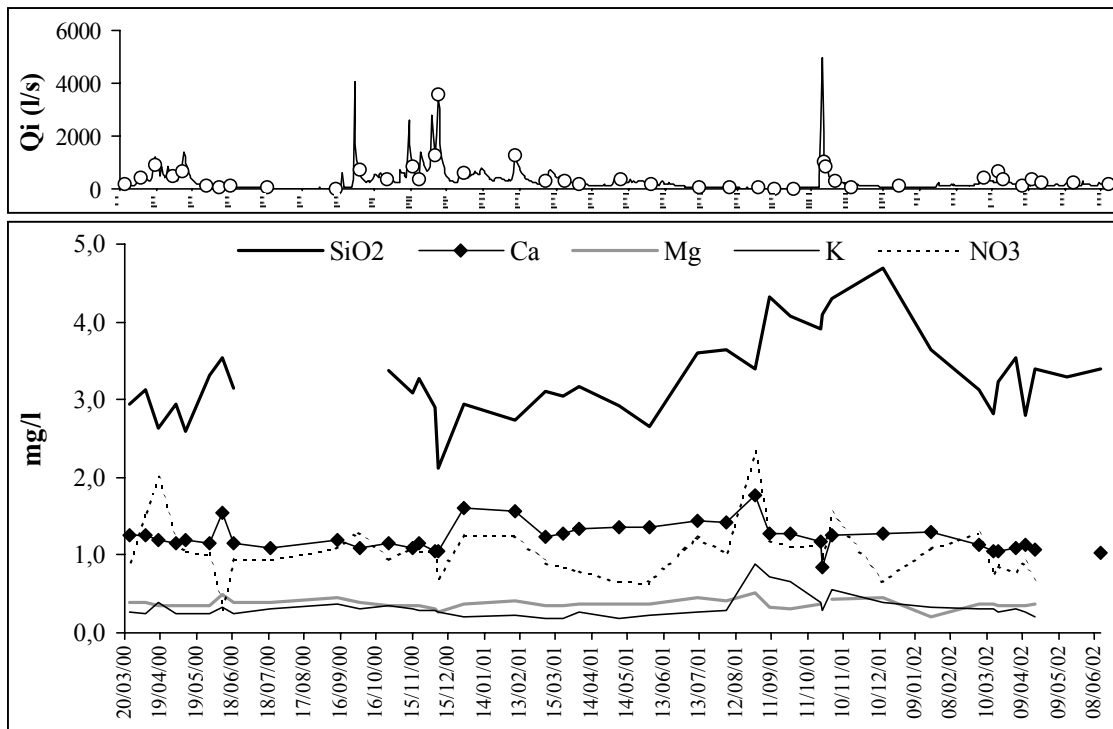
La figure supérieure indique les débits journaliers (trait) et les débits instantanés au moment des prélèvements (ronds).

Figure 6 - Variations des concentrations de certains éléments dans les eaux du ruisseau des Cloutasses sur la période 1999-2001.



La figure supérieure indique les débits journaliers (trait) et les débits instantanés au moment des prélèvements (ronds).

Figure 7 - Variations des concentrations de certains éléments dans les eaux de la Goudesche sur la période 1999-2001.



La figure supérieure indique les débits journaliers (trait) et les débits instantanés au moment des prélèvements (ronds).

Figure 8 - Variations des concentrations de certains éléments dans les eaux de l'Alignon à la station des Urfruits sur la période 2000-2002.

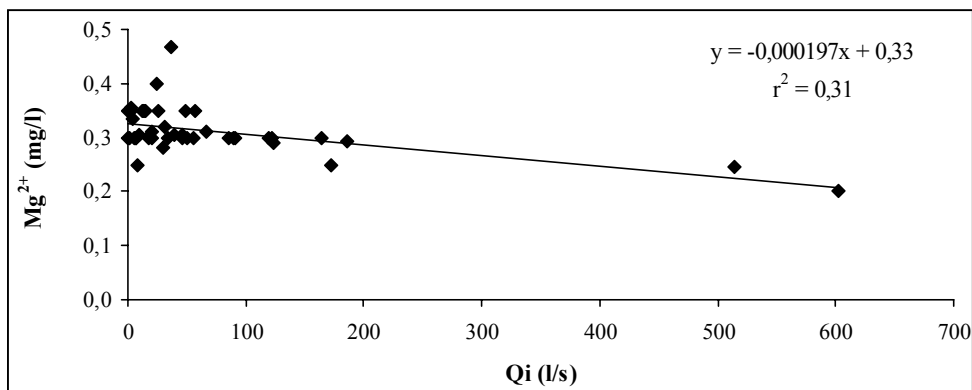


Figure 9 - Régression entre la concentration du magnésium et le débit instantané pour les eaux du ruisseau des Cloutasses sur la période septembre 1999-septembre 2002.

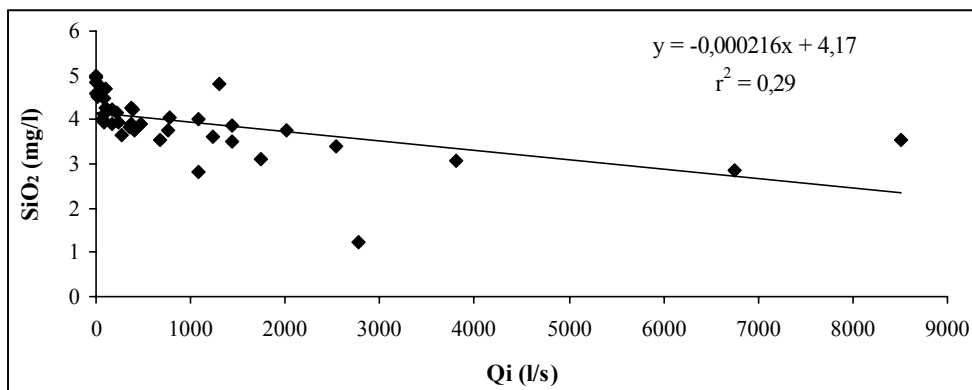


Figure 10 - Régression entre la concentration de la silice et le débit instantané pour les eaux du ruisseau de la Goudesche sur la période 1999-2002.

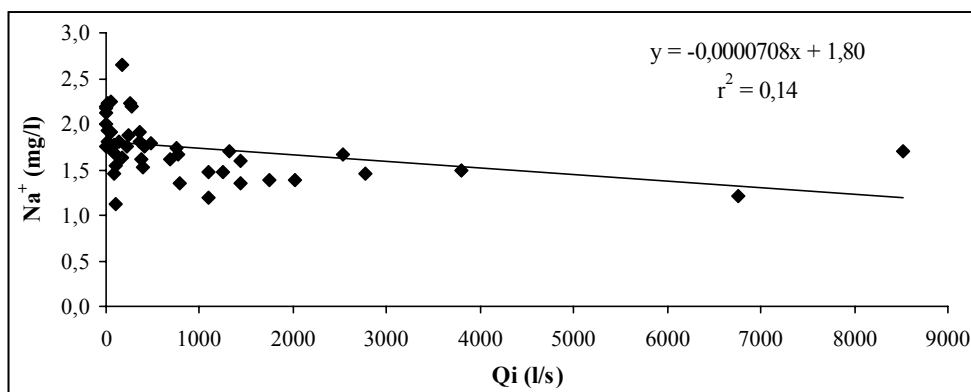


Figure 11 - Régression entre la concentration du sodium et le débit instantané pour les eaux du ruisseau de la Goudesche sur la période 1999-2002.

Tableau IX - Coefficients de corrélation linéaire (r) entre les paramètres mesurés dans les eaux de l'Alignon à la Baraquette sur la période 1999-2002.

	Cond	pH	SiO ₂	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Σ ⁺	NH ₄ ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻
SO ₄ ²⁻	+0,21	-0,47	-0,03	+0,04	+0,29	+0,35	+0,15	-0,21	-0,21	+0,10	+0,39	-0,11
NO ₃ ⁻	-0,02	-0,43	-0,01	-0,04	-0,09	+0,23	-0,05	-0,34	-0,34	-0,04	+0,29	
Cl ⁻	+0,45	-0,22	+0,06	+0,34	+0,37	+0,80	+0,39	-0,04	-0,04	+0,42		
HCO ₃ ⁻	+0,79	+0,63	+0,87	+0,83	+0,89	+0,40	+0,60	+0,69	+0,69			
NH ₄ ⁺	+0,20	+0,01	+0,13	+0,46	+0,16	+0,26	+0,16	+0,08				
Σ ⁺	+0,77	+0,27	+0,53	+0,94	+0,89	+0,60	+0,85					
Na ⁺	+0,63	+0,19	+0,59	+0,69	+0,66	+0,43						
K ⁺	+0,52	-0,19	+0,02	+0,46	+0,47							
Mg ²⁺	+0,82	+0,26	+0,47	+0,84								
Ca ²⁺	+0,66	+0,39	+0,51									
SiO ₂	+0,33	+0,28										
pH	+0,16											

Σ⁺ : somme des cations (méq/l). Nombre d'échantillons : 50, sauf pour conductivité - pH (76) et pour les régressions impliquant la silice (45), l'ammonium (46) et le bicarbonate (19 avec la conductivité et le pH, 16 avec l'ammonium, 17 avec les autres éléments).

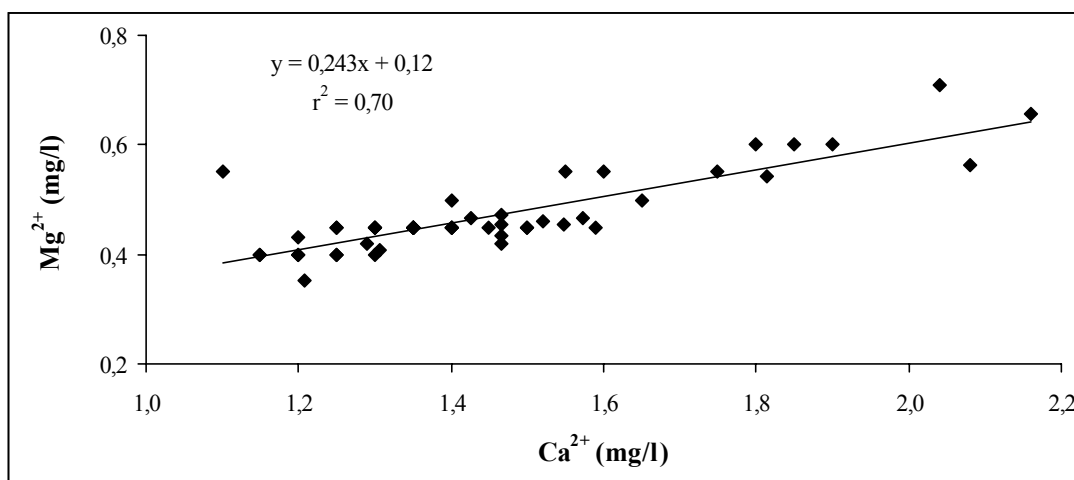


Figure 12 - Régression entre les concentrations du calcium et du magnésium pour les eaux de l'Alignon à la Baraquette sur la période 1999 - 2002.

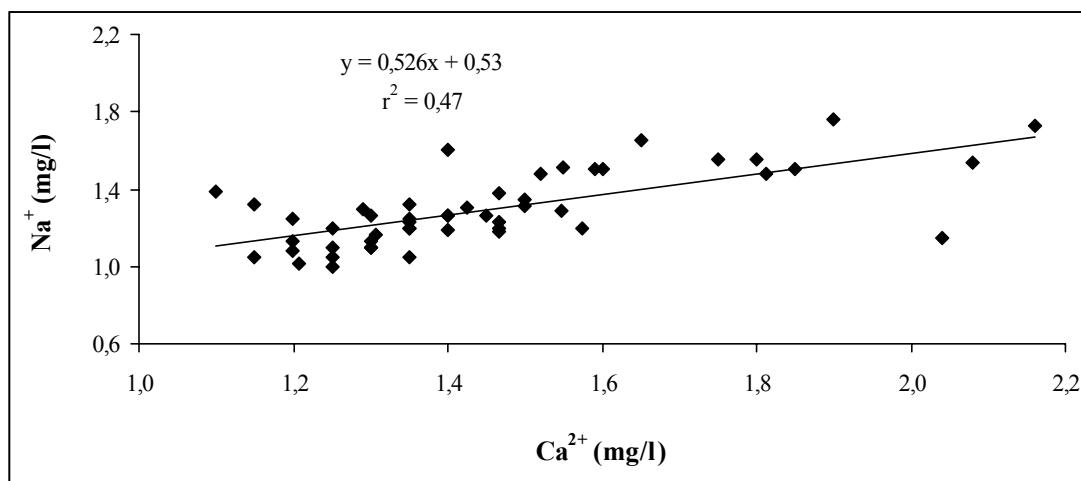


Figure 13 - Régression entre les concentrations du calcium et du sodium pour les eaux de l'Alignon à la Baraquette sur la période 1999-2002.

V - LES INTERROGATIONS SUR L'ÉVOLUTION DES EAUX ET LEUR ÉVENTUELLE ACIDIFICATION

Dans les régions françaises de roches cristallines, l'acidification des sols, et donc des eaux, peut constituer un phénomène naturel inéluctable (G. PÉDRO, 2002). Les activités anthropiques, et notamment les rejets de gaz carbonique et de composés d'acides forts, ont en outre considérablement accéléré les phénomènes d'acidification.

Dans un article paru en 1992, P. DURAND *et al.* concluent, sur la base de résultats fournis par le modèle MAGIC, à un risque d'acidification des eaux des bassins versants boisés du Mont-Lozère (pessière ou hêtraie). Dans le cas du maintien au niveau de 1984 des apports atmosphériques de soufre, le pH des eaux des ruisseaux de la Latte (pessière) et de la Sapine (hêtraie) descendrait en dessous de 5 dès 2020-2030 (contre 5,8 en 1984). Le risque serait moindre pour le bassin des Cloutasses (sous pelouse), où le pH atteindrait 5,5 vers 2050. Sous pessière, le pH continuerait à descendre jusqu'à la fin de la modélisation (4,8 environ en 2124). Sous hêtraie, il amorcerait une légère remontée à partir de 2070 (valeur minimale = 4,8). Une réduction de 60 % des apports de soufre entre 1984 et 2010 réduirait considérablement l'évolution des pH. La diminution la plus sensible serait enregistrée sous hêtraie : le pH approcherait 5,5 entre 2005 et 2020, puis les valeurs remonteraient légèrement, mais sans retrouver leur niveau antérieur à 1870 (pH = 6,1) avant la fin de la modélisation. Dans l'hypothèse d'une

diminution de 30 % des apports de soufre entre 1984 et 2010, le pH des eaux du bassin de la Latte (pessière) descendrait jusqu'à 5,2 environ en 2124.

B. GUILLET *et al.* (1997) utilisent une autre approche, l'évaluation des charges critiques acides. Le calcul de ces charges critiques, réalisé à partir de l'analyse chimique des eaux de plus d'une centaine de cours d'eau échantillonnés en mai et septembre 1996 sur une surface de 1650 km² dans les Cévennes cristallines, ne met pas en évidence de problème grave d'acidification. Dans l'ensemble, la région cévenole s'est révélée moins sensible à l'acidification que d'autres régions françaises, notamment les Vosges et les Ardennes. Le seul secteur susceptible de présenter une sensibilité à l'acidification englobe une grande partie du bassin versant de l'Alignon, puisqu'il couvre principalement la zone d'affleurement du granite du Pont-de-Montvert, entre le Pic Cassini et la forêt domaniale du Bougès. Toutefois cette sensibilité se manifesterait uniquement pour des apports acides compris entre 60 et 120 Kéq/km²/an. La borne inférieure de cette fourchette de valeurs est sensiblement plus forte que les apports annuels moyens dans les pluies incidentes mesurés à la station de La Vialasse de juillet 1984 à juin 1996 (39,4 Kéq/km² ; Précipitations moyennes : 1937 mm ; pH moyen : 4,64). Les apports maximaux ont atteint 86,0 Kéq/km² en 1984-85 (P : 2008 mm ; pH moyen : 4,39) et minimaux 14,0 Kéq/km² en 1986-87 (P : 1348 mm ; pH moyen : 4,98). Après la modification du protocole de mesure du pH, les apports mesurés sur la période 1999-2002 sont devenus beaucoup plus faibles, et cela d'autant plus que cette

période a été marquée par des retombées abondantes de poussières sahariennes. Pour finir, il convient d'ajouter que les recherches sur les pluviollessivats menées sur le Mont-Lozère (J. F. DIDON-LESCOT, 1995) ne mettent pas en évidence une augmentation des flux d'ions H^+ à travers le couvert végétal, sous hêtraie comme sous pessière, sauf effet de lisière.

Les calculs mis en œuvre dans la démarche adoptée par P. DURAND *et al.* comme dans celle utilisée par B. GUILLET *et al.*, reposent sur un certain nombre d'hypothèses dont certaines ne sont pas réellement validées : évolution des prélèvements d'éléments minéraux par la végétation pour le modèle MAGIC, altération des roches et des minéraux des sols pour les deux approches... Mais, surtout, le modèle MAGIC s'appuyait sur des mesures de pH non totalement satisfaisantes qui donnaient une vision pessimiste des apports acides et de l'état initial du milieu.

En complément de ces approches, dont les résultats peuvent être considérés, à bien des

égards, comme purement théoriques, on peut tenter de comparer les séries de mesures du pH réalisées sur des échantillons prélevés à plusieurs années d'intervalle.

1) Les indications des prélèvements de juin 1999 et de mai 2001

Les pH mesurés sur les eaux prélevées en juin 1999 et en mai 2001 fournissent des termes de comparaison avec les résultats obtenus en septembre 1982 (B. WEDRAOGO-DUMAZET, 1983) et en mai 1986 (A.S. FARAH, 1986) (Tab. X). L'interprétation des données est évidemment délicate, en raison, d'une part, de la variabilité du pH sur de courtes périodes (voir Fig. 6 à 8) et, d'autre part, des différences entre les matériels et les protocoles utilisés. De plus, les points de prélèvement communs à ces différentes séries sont peu nombreux. Les comparaisons ne peuvent donc pas être probantes. Mais elles fournissent cependant quelques informations qu'il ne faut pas négliger.

Tableau X - Comparaison des pH mesurés dans des eaux prélevées sur le bassin de l'Alignon entre 1982 et 2001.

	28/05/86	14/06/99	15/09/82	14/06/99	16/05/01	16/05/01
P La Vialasse (mm) sur 12 jours	7,5	288,7	50,6	288,7	50,9	50,9
P La Vialasse (mm) du jour	0,0	0,0	0,0	0,0	2,4	2,4
Qis (l/s/km ²) Cloutasses	20,9	77,8	13,0	77,8	53,1	53,1
Qis (l/s/km ²) Latte	32,8	148,7	9,7	148,7	51,3	51,3
Qis (l/s/km ²) Sapine	16,7	55,4	1,1	55,4	39,4	39,4
	pH [A]	pH [A]	pH [B-1]	pH [B-2]	pH [B-3]	pH [B-4]
Cloutasses (au limnigraphe)	6,00	5,75				
Latte (au limnigraphe)	5,80	5,75				
Cougneiral (près de la route)	5,98	5,65	6,23	6,15	6,42	6,10
Quaraze (près de la route)	6,00	5,75	6,35	6,25	6,40	6,22
Jouc (confluence avec l'Alignon)	6,10	5,90	6,43	6,28	6,40	6,22
Sapine (au limnigraphe)	6,00	5,85				
Faysse (près de la route)	5,85	6,15	6,00	6,38	6,51	6,37
Rouvières (près confluence)	6,30	5,78	6,54	6,22	6,58	6,41

P La Vialasse (mm) sur 12 jours : précipitations à la station de La Vialasse au cours des 12 jours ayant précédé celui des prélèvements. P La Vialasse (mm) du jour : précipitations à la station de La Vialasse le jour des prélèvements. pH [A] : pH avec agitation continue (pH-mètre Tacussel et électrode Bioblock). pH [B-1] : pH terrain sans agitation au moment de la mesure (matériel WTW). pH [B-2] : pH sans agitation au moment de la mesure (pH-mètre Tacussel et électrode Bioblock). pH [B-3] : pH sans agitation au moment de la mesure (matériel Radiometer – protocole de référence). pH [B-4] : pH sans agitation au moment de la mesure (pH-mètre Schott et électrode Bioblock).

La comparaison entre les séries du 28 mai 1986 et du 14 juin 1999 montre une sensible diminution du pH dans 7 cas sur 8. La moyenne arithmétique des valeurs mesurées passe de 6,00 en mai 1986 à 5,82 en juin 1999. Bien sûr, les prélèvements ont été effectués pour des conditions hydrologiques extrêmement variées (Tab. X). Mais on est loin, en tout cas, des diminutions spectaculaires de pH annoncées par le modèle MAGIC pour les ruisseaux de la Sapine (pH des eaux prévu pour 1999 : 5,1) et de la Latte (pH prévu : 5,35). En ce qui concerne ce dernier, le bassin versant a pourtant subi la perturbation d'une coupe forestière à blanc (1987 à 1989) qui n'était pas intégrée dans la modélisation. On constate en outre que les diminutions du pH enregistrées sur les ruisseaux de la Sapine et de la Latte sont inférieure ou égale à celle observée sur le ruisseau des Cloutasses. Or, d'après le modèle MAGIC, celui-ci ne devrait être que très modestement affecté par la diminution des pH.

La comparaison des pH mesurés le 15 septembre 1982 avec ceux mesurés le 28 mai 1999 et le 15 mai 2001 est elle aussi difficile, surtout que les prélèvements n'ont pas été effectués au cours des mêmes saisons. Rien n'indique cependant que les pH aient diminué entre 1982 et 2001 (pH [B-3]). On remarque par ailleurs que les forts débits lors des prélèvements de 1999 se sont traduits par des pH relativement faibles, ce qui, dans la comparaison entre les séries de 1986 et de 1999 (pH [A]), renforce l'idée que les eaux ne sont pas en cours d'acidification.

2) Les prélèvements de juin 2002

Une nouvelle campagne de prélèvements a

été réalisée les 13 et 14 juin 2002, quelques jours après des pluies assez abondantes qui se sont produites entre le 3 et le 9 juin (110 mm à la station de La Vialasse), mais dont les effets sont restés modestes sur l'écoulement des ruisseaux.

Cette campagne a été étendue à l'ensemble du bassin cristallin du haut Tarn (Tarn en amont de Cocurès et haut bassin du Briançon). Elle a été conçue avec un double objectif : d'une part, permettre une comparaison plus poussée avec les données antérieures et, d'autre part, participer à la connaissance de l'état actuel des eaux à partir de laquelle il sera possible de suivre les évolutions dans l'avenir. Trente trois échantillons ont été traités (pH et conductivité au moins), dont vingt ont subi une analyse chimique complète. Les données sont regroupées en annexes. Ces résultats viennent compléter les analyses effectuées par B. GUILLET *et al.* (1997) sur une vingtaine d'échantillons prélevés dans le bassin versant du haut Tarn.

Le tableau XI synthétise les résultats obtenus sur les échantillons prélevés en juin 2002 dans le bassin versant du haut Tarn. Toutes les eaux apparaissent faiblement minéralisées. Celles qui présentent les plus fortes conductivités proviennent de bassins versants qui renferment des roches sédimentaires (Trias, Lias, Jurassique) : bassins de Vallongue (112 $\mu\text{S}/\text{cm}/\text{cm}^2$), de Runes (60 $\mu\text{S}/\text{cm}/\text{cm}^2$) et de Ramposel (48 $\mu\text{S}/\text{cm}/\text{cm}^2$), situés dans la partie aval du terrain d'étude. En fait, les roches sédimentaires sont présentes dans beaucoup d'autres bassins versants (Goudesche, Martinet, Peyrou du Rieu-malet, Viala...). Leur influence se fait sentir non seulement sur la minéralisation des eaux, mais aussi sur les valeurs du pH.

Tableau XI - Caractères chimiques des eaux prélevées les 13 et 14 juin 2002 sur le bassin du haut Tarn.

	Cond.	pH	SiO ₂	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Σ^+	Σ^-
Moy.	27,48	6,77	4,42	1,38	0,47	0,33	1,40	5,50	1,12	0,57	2,35	0,177	0,177
Méd.	20,45	6,74	4,12	1,08	0,41	0,27	1,27	3,81	1,01	0,63	2,36	0,149	0,156
Min.	11,8	5,76	2,61	0,60	0,19	0,13	0,97	1,37	0,75	0,02	1,16	0,102	0,100
Max.	112,3	7,61	7,50	3,57	0,91	0,79	2,30	16,95	2,03	1,44	3,73	0,369	0,373

Moy. : moyenne. Méd. : médiane. Min. : minimum. Max. : maximum. Nombre d'échantillons considérés : 32 pour la conductivité et le pH, 19 pour les dosages des différents éléments.

Cond. : conductivité à 25°C mesurée au laboratoire. pH : pH à 25°C mesuré au laboratoire en petit godet avec très faible agitation avant la mesure. Les concentrations des éléments sont exprimées en mg/l. La somme des cations basiques (Σ^+) et la somme des anions (Σ^-) sont exprimées en méq/l (valeurs moyenne, médiane, minimum et maximum pour 19 échantillons).

Sur l'ensemble des prélèvements, le pH est compris entre 5,76 et 7,61. Il est inférieur à 6,50 dans 9 cas sur 32. Mais il ne descend en dessous de 6,00 qu'une seule fois, pour un échantillon prélevé dans une zone sourceuse située en tête de

bassin (Croix de Fer près du col de Finiels).

Les échantillons analysés en juin 2002 ont été comparés à ceux prélevés en septembre 1982 (Tab. XII) et en mai 1986 (Tab. XIII).

Tableau XII - Comparaison entre les caractères chimiques des eaux en septembre 1982 et en juin 2002.

	Septembre 1982				Juin 2002			
	Moyenne	Médiane	Minimum	Maximum	Moyenne	Médiane	Minimum	Maximum
pH	6,56	6,49	6,23	6,98	6,59	6,56	6,11	6,89
SiO ₂	4,57	3,82	0,32 (?)	5,99	4,38	3,81	3,34	6,36
Ca ²⁺	1,51	1,20	0,74	3,59	1,17	1,01	0,60	2,84
Mg ²⁺	0,47	0,38	0,17	0,87	0,43	0,38	0,20	0,70
K ⁺	0,31	0,18	0,14	0,61	0,34	0,27	0,14	0,79
Na ⁺	1,52	1,41	1,25	1,95	1,40	1,36	1,06	2,00
HCO ₃ ⁻	–	–	–	–	4,77	3,70	1,98	12,09
Cl ⁻	1,26	1,20	0,71	1,68	1,11	1,06	0,94	1,49
NO ₃ ⁻	–	–	–	–	0,56	0,47	0,02	1,44
SO ₄ ²⁻	2,65	2,34	1,71	4,62	2,21	2,21	1,22	3,50

Les concentrations des éléments sont exprimées en mg/l. – : données manquantes.

Nombre d'échantillons considérés : 10 pour le pH (Cougneiral, Quaraze, Rouvières, Jouc, Paul, Sugue – à l'est du bassin des Cloutasses –, prise de Pont-de-Montvert, Peyrou du Rieumalet, Rieumalet, Finiels-téléski) et 8 pour les dosages des différents éléments (ceux-ci n'ont pas été faits dans le cas de la Sugue en 1982 et en 2002 et dans celui du Rieumalet en 2002).

Tableau XIII - Comparaison entre les caractères chimiques des eaux en mai 1986 et en juin 2002.

	Mai 1986				Juin 2002			
	Moyenne	Médiane	Minimum	Maximum	Moyenne	Médiane	Minimum	Maximum
pH	6,18	6,10	5,40	7,08	6,48	6,44	5,76	7,27
SiO ₂	4,88	4,39	3,51	7,96	4,36	3,86	2,82	6,36
Ca ²⁺	1,48	1,24	0,72	3,08	1,21	0,99	0,60	2,84
Mg ²⁺	0,44	0,46	0,12	0,74	0,40	0,34	0,19	0,70
K ⁺	0,31	0,26	0,08	0,71	0,29	0,20	0,14	0,79
Na ⁺	1,42	1,32	1,06	2,18	1,33	1,23	0,97	2,00
HCO ₃ ⁻	–	–	–	–	4,70	3,12	1,37	12,21
Cl ⁻	1,14	1,00	0,78	1,62	1,06	1,01	0,78	1,49
NO ₃ ⁻	–	–	–	–	0,56	0,63	0,02	1,44
SO ₄ ²⁻	2,64	2,70	1,50	3,17	2,26	2,22	1,16	3,73

Les concentrations des éléments sont exprimées en mg/l. – : données manquantes.

Nombre d'échantillons considérés : 10 pour le pH (Latte, Cloutasses, Cougneiral, Quaraze, Rouvières, Jouc, Paul, Sugue, Viala, Peyrou du Rieumalet, Grésilière, Finiels-téléski, Croix-de-Fer) et 9 pour les dosages des différents éléments (les eaux du ruisseau de la Sugue n'ont pas été analysées en 2002).

En ce qui concerne les pH, la comparaison entre les séries de septembre 1982 et juin 2002 ne fait apparaître aucune différence manifeste. Les pH diffèrent sensiblement entre mai 1986 et juin 2002, mais les différences sont de l'ordre de

grandeur des différences attendues entre les mesures effectuées selon le protocole utilisé en 2002 (matériel Radiometer, petit godet, très faible agitation avant la mesure) et celui qui était suivi en 1986 (électrode Bioblock, utilisation

d'un agitateur magnétique pendant la mesure).

Les différences les plus sensibles entre la série de juin 2002 et les deux séries antérieures portent sur le calcium et le sulfate. Ces écarts peuvent être dus à une évolution sur le long terme, à des fluctuations liées aux conditions pluviométriques avant les prélèvements et/ou aux analyses elles-mêmes. À cet égard, le tableau XIV montre que, pour le ruisseau des Cloutasses,

les concentrations du calcium et du sulfate subissent des fluctuations importantes d'une année à l'autre, mais il ne met pas en évidence d'évolution sur le long terme ou de problème analytique. En 1986, P. DURAND *et al.* (1992) ont du reste mesuré des concentrations relativement fortes de calcium et de sulfate à la suite de l'étiage particulièrement sévère de l'automne 1985 et de l'enneigement très abondant de l'hiver 1986.

Tableau XIV - Concentrations (en mg/l) du calcium et du sulfate dans les eaux du ruisseau des Cloutasses en septembre 1986, septembre 1999, septembre 2000 et septembre 2002.

	29 septembre 1986 *	30 septembre 1999 □	20 septembre 2000 □	2 septembre 2002 #
pH	(6,00)	6,23	6,32	6,28
Ca ²⁺	1,30	1,15	1,25 °	1,35
SO ₄ ²⁺	2,95	2,70	3,94 °	2,63

* : Laboratoire de Géochimie Organique d'Orléans (pH mesuré avec une électrode Bioblock, avec agitation pendant la mesure). □ : Centre de Géomorphologie du CNRS à Caen. # : Service Central d'Analyse du CNRS à Vernaion. ° : concentrations maximales pour 3 prélèvements effectués en septembre 2000.

VI - BILANS HYDROCHIMIQUES "ENTRÉES - SORTIES"

Les tableaux XV à XVIII fournissent, à titre d'exemples, les bilans "entrées - sorties" des bassins versants de la Latte et des Urfruits pour les années 2000-01 à 2001-02.

Les entrées annuelles d'éléments minéraux sur les bassins versants ont été déterminées à partir des concentrations moyennes annuelles (moyennes pondérées par les précipitations) dans les eaux de pluie recueillies par les collecteurs : La Vialasse pour le bassin de la Latte ; La Vialasse et Jouc pour celui des Urfruits. Les calculs s'appuient en outre sur les relations établies sur la période 1989-1994 entre les concentrations à la station de la Vialasse et celles aux postes de la Latte et de la Sapine.

Les exportations en solution ont été estimées à partir des équations des droites de régression annuelles entre les concentrations et les débits. Cette approche n'est pas idéale (C. DUPRAZ *et al.*, 1984 ; C. MARTIN, 1987), mais elle est certainement parmi les plus fiables possibles compte tenu de l'échantillonnage réalisé.

Pour le ruisseau de la Latte, dont la station hydrométrique est difficile d'accès, très peu

d'échantillons ont été prélevés en crue. Les régressions utilisées ont donc été établies sur l'ensemble de la période d'observation 2000-2002. De plus, les données correspondant à de très faibles débits (< 4 l/s) n'ont pas été prises en considération. Pour l'Alignon aux Urfruits, les équations ont été déterminées pour chaque année.

Les déficits d'écoulements trouvés pour le bassin versant de l'Alignon en amont des Urfruits, sont faibles, en particulier en 2000-2001, par comparaison avec ceux du bassin de la Latte. À ce sujet, sur l'ensemble des deux années de suivi, et sans tenir compte du rôle de la végétation dans le piégeage des dépôts "secs" (pluviolessivats), les exportations du chlorure apparaissent sensiblement supérieures aux apports avec les eaux de pluie pour le bassin de l'Alignon, alors qu'elles leur sont inférieures pour le bassin de la Latte (situation habituelle sur la période 1981-97 – C. MARTIN et J.F. DIDON-LESCOT, 2003). Le chlorure n'étant pas un élément fortement retenu dans les bassins versants, le déficit d'écoulement pourrait être sous-estimé dans le premier cas, et surestimé dans le second. Quoi qu'il en soit, le bassin de l'Alignon en amont des Urfruits manifeste malgré tout un comportement hydrochimique assez proche de celui mis en évidence sur les petits bassins versants (Latte, Sapine, Cloutasses). Les années sèches sont favorables à l'accumulation nette de certains éléments

Tableau XV - Bilan hydrochimique "entrées - sorties" du bassin versant de la Latte en 2000-01.

	P et L	SiO ₂	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	NH ₄ ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
Entrées	2 715	0,00	1,930	0,280	0,345	1,319	0,815	—	2,350	3,544	5,820
Sorties	1 916	6,850	2,423	0,694	0,696	1,670	<0,07	2,691	2,621	1,478	7,902
e - s	799	- 6,85	- 0,49	- 0,41	- 0,35	- 0,35	>+0,75	—	- 0,27	+ 2,07	- 2,08

P : précipitations (mm). L : lame d'eau écoulée (mm). Pour les exportations en solution, entrées (e) et sorties (s) sont exprimées en t/km². — : données manquantes.

Tableau XVI - Bilan hydrochimique "entrées - sorties" du bassin versant de la Latte en 2001-02.

	P et L	SiO ₂	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	NH ₄ ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
Entrées	1 759	0,126	2,012	0,290	0,372	1,182	0,718	2,201	1,935	2,094	2,902
Sorties	916	3,199	1,237	0,402	0,270	0,843	< 0,04	1,660	1,029	0,809	3,601
e - s	843	- 3,07	+ 0,78	- 0,11	+ 0,10	+ 0,34	>+0,68	+ 0,54	+ 0,91	+ 1,29	- 0,70

P : précipitations (mm). L : lame d'eau écoulée (mm). Pour les exportations en solution, entrées (e) et sorties (s) sont exprimées en t/km².

Tableau XVII - Bilan hydrochimique "entrées - sorties" du bassin versant de l'Alignon aux Urfruits en 2000-01.

	P et L	SiO ₂	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	NH ₄ ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
Entrées	2 588	0,00	1,69	0,25	0,35	1,16	0,65	—	2,06	2,67	5,19
Sorties	2 281	7,35	2,91	0,90	0,60	2,74	0,01	5,94	2,78	2,29	6,21
e - s	307	- 7,35	- 1,22	- 0,65	- 0,25	- 1,57	+ 0,64	—	- 0,72	+ 0,38	-1,02

P : précipitations (mm). L : lame d'eau écoulée (mm). Pour les exportations en solution, entrées (e) et sorties (s) sont exprimées en t/km². — : données manquantes.

Tableau XVIII - Bilan hydrochimique "entrées - sorties" du bassin versant de l'Alignon aux Urfruits en 2001-02.

	P et L	SiO ₂	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	NH ₄ ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
Entrées	1 548	0,12	1,60	0,23	0,36	0,93	0,54	2,57	1,51	2,94	3,77
Sorties	1 010	3,35	1,33	0,38	0,45	1,21	0,07	3,34	1,33	1,15	2,61
e - s	538	- 3,22	+ 0,27	- 0,15	- 0,10	- 0,29	+ 0,47	- 0,76	+ 0,18	+ 1,79	+ 1,15

P : précipitations (mm). L : lame d'eau écoulée (mm). Pour les exportations en solution, entrées (e) et sorties (s) sont exprimées en t/km².

minéraux, notamment du calcium. Lors des années humides, les entrées d'ammonium et de nitrate restent supérieures aux sorties.

Le bassin versant de la Latte a subi, de 1987 à 1989, sur plus de 80 % de sa superficie, une coupe à blanc de son couvert d'épicéas. Cette coupe a été suivie par une replantation en résineux. Pour ce bassin, nous avons comparé les exportations en solutions effectuées en 2000-01

et 2001-02, avec les valeurs calculées à partir des régressions linéaires entre les flux sortants et les lames d'eau écoulées sur la période 1981-87, antérieure à la coupe des épicéas (Tab. XIX et XX). Hormis pour le sulfate, les coefficients de corrélations (r) dépassent 0,80. Ils sont compris entre 0,59 (sulfate) et 0,92 (magnésium). La relation utilisée pour le nitrate est fondée sur deux années d'observation seulement.

Tableau XIX - Comparaison des exportations en solution (t/km^2) du bassin de la Latte en 2000-01 avec les valeurs calculées à l'aide des régressions, entre les exportations et les lames d'eau écoulées, établies sur la période 1981-87.

	L (mm)	SiO ₂	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
Sorties "mesurées"	1916	6,85	2,42	0,69	0,70	1,67	2,62	1,48	7,90
Valeurs calculées		5,31	2,30	0,90	0,63	2,23	2,29	4,39	6,59

L : lame d'eau écoulée.

Tableau XX - Comparaison des exportations en solution (t/km^2) du bassin de la Latte en 2001-02 avec les valeurs calculées à l'aide des régressions, entre les exportations et les lames d'eau écoulées, établies sur la période 1981-87.

	L (mm)	SiO ₂	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
Sorties "mesurées"	916	3,20	1,24	0,40	0,27	0,84	1,03	0,81	3,60
Valeurs calculées		2,86	1,41	0,52	0,23	1,30	1,69	0,13	4,33

L : lame d'eau écoulée.

Les tableaux XIX et XX, confirment que, sur le plan hydrochimique, le fonctionnement actuel du bassin versant de la Latte diffère assez peu de celui observé avant la coupe des épicéas (P. DURAND, 1989). Les exportations de cations basiques ne sont plus stimulées, comme dans les années qui ont suivi la coupe, par la lixiviation de grandes quantités de nitrate (J.F. DIDON-LESCOT, 1996 ; C. MARTIN et J.F. DIDON-LESCOT, 2003). En ce qui concerne cet élément, le tableau XXI laisse même supposer que les sorties ont diminué par rapport à la situation avant la coupe, alors que les épicéas étaient en phase de dépérissement. L'interprétation doit cependant rester prudente, car l'équation fournissant les "valeurs calculées" des sorties de nitrate repose sur deux années de suivi seulement.

VII - CONCLUSION

Sauf dans les bassins versant renfermant des roches sédimentaires, les eaux des ruisseaux du bassin du haut Tarn sont très faiblement

minéralisées. Elles sont modérément acides (pH supérieures à 6,0 et même le plus souvent à 6,5) et aucune acidification n'est décelable depuis 1982 ou 1986.

Les entrées d'éléments minéraux atmosphériques mesurées en solution dans les eaux de pluie sur la période 1999-2002, ne montrent pas de modification nette par rapport aux observations plus anciennes. Il semblerait cependant que les apports de nitrate aient augmenté. Une attention particulière mériterait d'être portée à ce problème.

Les poussières sahariennes participent aux entrées d'éléments minéraux atmosphériques. En apportant de la calcite et de la dolomie, elles fournissent des quantités de calcium et de magnésium qui ne sont pas totalement prises en compte par les analyses chimiques des eaux de pluie. Ces quantités sont en elles-mêmes modestes, mais elles ne sont pas négligeables au regard des bilans hydrochimiques "entrées - sorties". Elles contribuent, en tout cas, en jouant sur le complexe adsorbant des sols, à maintenir le pH des eaux près de la neutralité.

Remerciements : Les recherches ont été menées dans le cadre d'une convention avec le Parc national des Cévennes pour une étude intégrée du bassin versant du Haut-Tarn appliquée à la gestion des ressources en eau et des fonctionnements hydrobiologiques. Cette convention a été financée par l'Agence de l'Eau Adour-Garonne et par la DIREN Languedoc-Roussillon. Une partie des analyses d'eau a été confiée au Centre de Géomorphologie du CNRS à Caen (Anne-Véronique WALTER et Jacques QUILLARD) et à l'unité de Biogéochimie Marine - TAO/Laboratoire de Géologie de l'ENS à Montrouge (Nicole CATEL). Marie-Dominique LOÏE-PILOT (ENS Paris) s'est chargée des

observations sur les poussières sahariennes. Nous lui sommes également reconnaissants de sa lecture critique du manuscrit.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AVILA A., QUERALT-MITJANS I. et ALACÓN M. (1997) - Mineralogical composition of African dust delivered by red rains over northeastern Spain. *Jour. Geophys. Res.*, vol. 102, n° D18, p. 21977-21996.
- BEAUDOU D. et FOISSY J.M. (2003) - *Étude piscicole de la Goudesche et de l'Alignon, affluent du Tarn (Lozère). Bilan des campagnes 1998 à 2002*. Étude intégrée des ressources en eau et des fonctionnements hydrobiologiques sur le bassin versant du Haut-Tarn, rapport final au PnC, 32 p.
- CELLE H. (2000) - *Caractérisation des précipitations sur le pourtour de la Méditerranée occidentale – approche isotopique et chimique*. Thèse de l'Université d'Avignon, 201p.
- COSTE M., TISON J. et DELMAS F. (2004) - *Volet d'étude "Communautés diatomiques de l'Alignon et de la Goudesche"*. Étude intégrée des ressources en eau et des fonctionnements hydrobiologiques sur le bassin versant du Haut-Tarn, Édit. Cemagref, 19 p. + planches et annexes.
- DIDON-LESCOT J.F. (1996) - *Forêt et développement durable au Mont-Lozère. Impact d'une plantation de résineux, de sa coupe et de son remplacement sur l'eau et sur les réserves minérales du sol*. Thèse de l'Université d'Orléans, 161 p.
- DUBLANCHET F. (1999) - *Premiers résultats sur les bassins versants de l'Alignon et de la Goudesche (haut bassin du Tarn). Hydrologie, qualité des eaux, hydrobiologie, cartographie des habitats aquatiques*. Mémoire de DUT, IUT de Perpignan et UMR ESPACE du CNRS, 42 p. + annexes.
- DUMONT B. et ARCHAMBAUD G. (2003) - *Hydrobiologie : Étude des macro-invertébrés benthiques. Bilan des connaissances*. Étude intégrée des ressources en eau et des fonctionnements hydrobiologiques sur le bassin versant du Haut-Tarn, rapport au PnC, Édit. Cemagref, 42 p.
- DUPRAZ C., WEDRAOGO-DUMAZET B. et DUBREULE A. (1984) - Échantillonnages adaptés et méthodes de calcul automatique pour l'évaluation de la charge soluble dans les petits bassins versants. *Physio-Géo*, n° 9, p. 99-116.
- DURAND P. (1989) - *Biogéochimie comparée de trois écosystèmes (pelouse, hêtraie, pessière) de moyenne montagne granitique (Mont-Lozère, France)*. Thèse de l'Université d'Orléans, 186 p.
- DURAND P., LELONG F. et NEAL C. (1992) - Modélisation des effets hydrochimiques à long terme des dépôts acides et des reboisements dans les bassins versants du Mont-Lozère (Sud de la France). *Revue des Sciences de l'Eau*, vol. 5, p. 229-245.
- DURAND P., NEAL C., LELONG F. et DIDON-LESCOT J.F. (1992) - Effects of land-use and atmospheric input on stream and soil chemistry : field results and long-term simulation at Mont-Lozère (Cevennes National Park, Southern France). *The Science of the Total Environment*, vol. 119, Édit. Elsevier, p. 191-209.
- FARAH A.S. (1986) - *Variabilité spatiale de la composition chimique des eaux drainant le massif du Mont-Lozère, campagne 1984-85*. Mémoire de DEA, Université d'Orléans, 42 p.
- GUILLET B., DIDON-LESCOT J.F., VIDAL M., BOURGUIGNON S., NGUYEN S. et BOIVENT B. (1997) - *Participation au programme "Charges Critiques". L'évaluation des charges critiques acides sur les bassins versants du Mont-Lozère et extension à la région Sud-Cévenole*. Rapport de fin de contrat de recherche, Département des Sciences de la Terre, Université d'Orléans, 42 p. + annexes.
- LOÏYE-PILOT M.D., MARTIN J.M. et MOREL-LI J. (1986) - Influence of Sahara dust on the rain acidity and atmospheric input to the Mediterranean. *Nature*, vol. 321, n° 6068, p. 427-428.
- MARTIN C. (1987) - Les mesures de l'érosion chimique dans les bassins versants de roches cristallines : comparaison des résultats obtenus par différentes méthodes d'investigation dans le massif des Maures (Var - France). *Z. für Geomorphologie*, t. 31, n° 1, p. 73-84.

- MARTIN C. et DIDON-LESCOT J.F. (2003) - Fonctionnement hydrochimique des bassins versants expérimentaux du Mont-Lozère (France) et conséquences d'une coupe forestière. *Z. für Geomorphologie*, t. 47, n° 1, p. 117-140.
- PÉDRO G. (2002) - Conclusions au colloque "acidification des sols". 4-5 avril 2001, Versailles. *Étude et Gestion des Sols*, vol. 9, n° 3, p. 225-228.
- ULRICH E. (2003) - Le réseau RENECOFOR. Réseau National de suivi à long terme des ÉCOSystèmes FOREstiers. *ORE Fonctionnement des Écosystèmes Forestiers*, rapport 2003, p. 187-202.
- ULRICH E., CODDEVILLE P. et LANIER P. (2002) - *Retombées atmosphériques humides en France entre 1993 et 1998*. ADEME Éditions, Coll. Données et Références, coéditeurs Office National de Forêts et École des Mines de Douai, 123 p.
- WEDRAOGO-DUMAZET B. (1983) - *Modification de la charge chimique des eaux au cours du transit à travers trois écosystèmes distincts du Mont-Lozère (hêtraie, pessière, pelouse)*. Thèse de Doctorat de 3^{ème} Cycle, Université d'Orléans, 147 p.